



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA INDUSTRIA
INGENIERIA MECÁNICA**

TITULO

Análisis de Prueba de inyección, diseño de red de tubería y selección de bomba para el pozo de reinyección RMT-1 del campo Geotérmico Momotombo.

AUTORES

Br. Kevin Yamil Gutiérrez Donaire.

Br. Higo Jordany Jiménez Lira.

Br. Jorge Luis Espinoza Montoya.

TUTOR

Ing. Juan José Ruiz Calderón.

Managua, 18 de Noviembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de corazón a DIOS, nuestro creador, guía y centro de nuestra vida; por permitirnos culminar con los estudios universitarios para optar a título de ingenieros mecánicos.

A nuestros padres que han hecho todo lo posible por brindarnos una educación profesional para forjarnos un futuro mejor.

A nuestro asesor el Dr. Enrique Porras que con su ayuda incondicional, transmitiéndonos sus conocimientos en la especialidad de Ingeniería de Reservorios, ha hecho posible realizar este trabajo monográfico de gran importancia para el desarrollo de la energía renovable en Nicaragua.

Al jefe de taller de mediciones del campo geotérmico Momotombo, Técnico Superior. Ernesto Alberto Gutiérrez Jirón, encargado de realizar la prueba de inyección en el Pozo RMT-1, por brindarnos todo su apoyo, facilitarnos la información necesaria durante la realización de monografía en la planta geotérmica.

Al señor Wilfredo Suarez del departamento de obras civiles del campo geotérmico.

Al gerente general de la planta geotérmica ORMAT-Momotombo, Lic. David Stadthagen por permitirnos llevar a cabo el presente trabajo.

A nuestro tutor Ing. Juan José Ruiz Calderón por su disposición como maestro, guía y amigo durante nuestra carrera universitaria.

DEDICATORIA

**CON AMOR Y RESPETO
A Dios y a nuestros Padres.**

RESUMEN

El presente trabajo monográfico muestra el análisis de los resultados obtenidos de una prueba de inyección realizada en el pozo RMT-1 del campo geotérmico de Momotombo el 12 de abril del 2013, a través de un software especializado que se utiliza en este tipo de estudios, para posteriormente calcular el caudal de salmuera adecuado que se debe reinyectar a dicho pozo acorde a la capacidad de absorción del mismo y el flujo másico disponible del sistema de reinyección.

Con el caudal seleccionado se procede a diseñar la nueva red de tubería que se utilizará para el traslado del fluido desde la planta binaria ORMAT Energy Converter (OEC) hacia el pozo RMT-1. Tomando en cuenta las respectivas consideraciones y metodología de diseño (longitud y diámetro de tubería, elevaciones, tipo de tubería, tipo y espesor de aislamiento, tipos y cantidad de soportes).

Así al finalizar nuestro diseño seleccionamos la bomba que requiere el sistema para realizar el trabajo de manera eficiente, considerando que se debe comprar 2 bombas iguales (de trabajo y de emergencia), para que no se detenga la reinyección.

Finalizamos nuestro trabajo monográfico con la presentación de una estructura de costos del proyecto, el debido análisis de beneficio ambiental que conlleva la ejecución del mismo y las pertinentes recomendaciones que son necesarias para garantizar el óptimo funcionamiento y administración del sistema de reinyección del campo geotérmico Momotombo.

CONTENIDO

ÍNDICE	pág.
AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
1. GENERALIDADES.	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	
2.1 Marco teórico.....	6
2.2 Generalidades del sistema de reinyección en el campo geotérmico Momotombo.....	12
2.3 Descripción del pozo RMT-1.....	14
3. ANÁLISIS DE PRUEBA DE INYECCIÓN EN EL POZO RMT-1	
3.1 Descripción de prueba de inyección en el pozo RMT-1.....	17
3.2 Resultados de la prueba de inyección para el pozo RMT-1.....	20
3.3 Parámetros iniciales.....	22
3.4 Modelos de la prueba de inyección.....	22
3.5 Tablas de Resultados de Prueba de inyección.....	28
3.6 Modelo del primer paso de Prueba de inyección.....	29

3.7	Modelo del segundo paso de Prueba de inyección.....	31
3.8	Modelo de todos los pasos de la Prueba de inyección.....	33
3.9	Cálculo del caudal de inyección y de presión de cabezal adecuados para el pozo RMT-1.....	35

4. DISEÑO DE RED DE TUBERÍA.

4.1	Establecimiento de los parámetros de diseño.....	45
4.2	Cálculo del diámetro de tubería.....	46
4.3	Selección del material de tubería, cédula y tipo de aislante térmico.....	47
4.4	Selección de los accesorios.....	58
4.5	Comprobación de la resistencia del arreglo por esfuerzos térmicos.....	59
4.6	Cálculos necesarios para dimensionamiento y ubicación de los distintos tipos de soportes.....	61
4.7	Ubicación de los Loops, soportes móviles y puntos fijos.....	65

5. SELECCIÓN DE LA BOMBA.

5.1	Fórmula de Hazen Williams.....	66
5.2	Cálculo del NPSH requerido y NPSH disponible.....	69

6. COSTO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS DE SISTEMA DE BOMBEO.

6.1	Estructura de costos de Proyecto.....	72
-----	---------------------------------------	----

7. ANÁLISIS DE BENEFICIO AMBIENTAL.

7.1	Análisis de Salmuera.....	73
-----	---------------------------	----

8. CONCLUSIONES.....75

9. BIBLIOGRAFÍA.....76

10. ANEXOS.



1. GENERALIDADES.

1.1 Introducción

La geotermia es una fuente de energía renovable ligada a volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas geológicamente recientes, es decir, con actividad en los últimos diez o veinte mil años en la corteza terrestre.

Para obtener esta energía es necesaria la presencia de yacimientos de agua caliente cerca de esas zonas. Se realiza una perforación y se extraerá vapor a alta presión y temperatura que aprovechará para accionar una turbina que con su rotación mueve un generador que produce energía eléctrica. El agua geotérmica utilizada se devuelve posteriormente al pozo de reinyección, mediante un proceso de inyectividad, para mantener la presión y sustentar el reservorio.

La planta geotérmica ORMAT -Momotombo se compone en su actualidad de 11 pozos productores, 6 pozos de reinyección, dos unidades de 35 MW cada y una planta binaria que produce 8 MW para una capacidad de diseño total de 78 MW instalados, de lo cual genera actualmente 34 MW esto representa un 2.89% de la capacidad instalada de nuestro país.

Nuestro estudio consiste en el análisis de una prueba de inyección en el pozo de reinyección RMT-1 para determinar la capacidad de absorción de salmuera de este y a su vez el flujo másico que será inyectado, diseñar la red de tubería y selección de la bomba.

Durante la prueba del pozo, la permeabilidad del reservorio tiende a cambiar las condiciones de inyección. Sin embargo esta permeabilidad puede disminuir ó incrementar la presión y temperatura, que es una característica propia del reservorio.



1.2 Antecedentes

En Nicaragua el desarrollo geotérmico se inicia en 1966, cuando una empresa italiana ELECTROCONSUL arriba al país con el objetivo de examinar la existencia de campos geotérmicos, el día miércoles 13 de noviembre de 1974 se inicia la perforación del pozo MT-1 así continuaron las perforaciones de pozos hasta completar un total de 32 en agosto de 1978. En marzo de 1981 se inicia la construcción de la primera unidad concluyéndose en septiembre de 1983 alimentada por 5 pozos, en 1989 se amplía el proyecto con la inauguración de la segunda unidad la cual es alimentada por 6 pozos, sin embargo por falta de vapor en el campo no se pueden producir los 70MW instalados así pasan los años y nunca se logra abastecer el vapor para producir los 70 MW así se continua perdiendo potencia hasta llegar al año 1999 en que la planta genera 8MW a punto de colapsar y es licitada llegando a una concesión de 15 años a la organización ORMAT la cual inmediatamente inicia la rehabilitación de la planta de Geotérmica de Momotombo.

La generación al momento de toma de posesión era de 8 MW enviado a la red nacional, la primera fase de la inversión incluyo perforación de tres nuevos pozos profundos y la instalación de un sistema de reinyección del 100 % de la salmuera, adicionalmente perforación del cuarto pozo profundo, se limpiaron los pozos poco profundos dañados y con bastante incrustación, se instaló un sistema de inhibición química para evitar futuras incrustaciones y se han hecho tratamiento de estimulación por acido en algunos pozos.

Al final de los tres primeros años con ORMAT la potencia de la planta aumento hasta 25 MW hacia la red limitada por las condiciones del campo (flujo muy pequeño y temperaturas bajas para operar la segunda turbina de vapor), en vista de que el potencial del campo es limitado ORMAT buscó mejorar la utilización de los recursos existentes se invierte en la construcción de un CONVERTIDOR DE ENERGIA ORMAT, por sus siglas en inglés (OEC) diseñado para utilizar el calor



de la salmuera antes de la reinyección entregando otros 7 MW de electricidad a la red nacional aumentando la capacidad disponible hasta 31MW.

Con lo anterior se logra cuadruplicar la generación ecológica vendida a 4.9 centavos /Kwh ahorrando 65.000 toneladas de combustible y disminuyendo la producción de Dióxido de Carbono (CO₂) en más de 100.000 toneladas de CO₂ por año; se detuvo la polución del lago por salmuera, el proyecto de energía geotérmica se convirtió en benigno para el medio ambiente con la reinyección del 100% de salmuera.

La planta rehabilitada fue entregada recientemente al estado que este a su vez entregó en concesión a una organización privada de socios mexicanos bajo el nombre de MPC (Momotombo Power Company).



1.3 Justificación

El sistema de reinyección del Campo Geotérmico Momotombo ha sufrido graves variaciones que llegó a tal punto de permanecer un tiempo fuera de servicio. En consecuencia ha afectado de manera significativa la vida útil del reservorio y provocado serio daño al medio ambiente ya que se vertía salmuera al lago Xolotlán aumentando su contaminación.

Debido a la necesidad e importancia de reinyectar salmuera a través de los pozos de reinyección para mantener por mayor tiempo el reservorio del campo geotérmico Momotombo, contribuir con la recarga hídrica del mismo y disminuir el impacto ambiental es necesario aumentar el porcentaje de reinyección de los pozos reinyectores; siendo además un requisito obligatorio que debe cumplir la planta generadora como parte de las leyes de conservación del medio ambiente para la generación de energía geotérmica.

Para lograr lo antes mencionado se deben realizar pruebas de inyección, que mediante un análisis detallado de los datos obtenidos, determinen la capacidad actual de absorción de los pozos de reinyección y en dependencia de los resultados proceder a diseñar una nueva red de tubería y selección de la bomba que sea capaz de trasladar la salmuera procedente de la Planta Binaria ORMAT Energy Converter (OEC) hacia los pozos de reinyección.

Una prueba de inyektividad fue realizada en el pozo de reinyección RMT-1 el 12 de Abril del presente año; con el propósito de conocer la capacidad de absorción del pozo en estudio y de esta forma brindar nuestro aporte en pro de aumentar la eficiencia del sistema de reinyección.



1.4 Objetivos

Objetivo General

Diseñar una nueva red de tubería y seleccionar el sistema de bombeo adecuado para reinyectar el fluido geotérmico procedente de la planta binaria ORMAT ENERGY CONVERTER (OEC) en el pozo reinyector RMT-1 del campo Geotérmico de Momotombo.

Objetivos específicos

- Analizar los resultados de la prueba de inyección para determinar el caudal que el pozo RMT-1 podría aceptar.
- Establecer la trayectoria de la red de tubería para el pozo RMT-1.
- Seleccionar el equipo de bombeo, diámetro y espesor adecuado de la tubería y accesorios, anclajes, soportes, aislamiento térmico, etc. desde el punto de vista hidráulico y mecánico.
- Determinar las propiedades químicas del fluido de reinyección.
- Determinar el beneficio ambiental obtenido con la implementación de este proyecto.
- Establecer la estructura de costos del proyecto.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1 Marco teórico

Analizar la inyectividad de un pozo geotérmico puede resultar muy complejo y tener diferentes definiciones por lo que en este capítulo se presentan algunos términos que nos ayudaran a comprender de forma sencilla lo que es una prueba de inyección, los parámetros deben ser estudiados para determinar el comportamiento del reservorio, además de los conceptos básicos para el diseño del sistema de bombeo.

Sistema geotérmico

Puede ser descrito esquemáticamente como "agua convectiva en la corteza superior de la Tierra la cual, en un espacio confinado, transfiere calor desde una fuente de calor hasta una abertura de calor, usualmente la superficie libre" (Hochstein, 1990). Un sistema geotérmico está constituido por 3 elementos principales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido, el cual es el medio que transfiere el calor.

Fuente de calor

La fuente de calor es el medio que transfiere el calor, este puede ser tanto una intrusión magmática a muy alta temperatura ($> 600^{\circ}\text{C}$), emplazada a profundidades relativamente someras (5-10 km) o bien, como en sistemas de baja temperatura donde el gradiente geotérmico es menor al valor promedio.



Reservorio

El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen el calor. Generalmente el reservorio está cubierto por rocas impermeables y está conectado a un área de recarga superficial a través de la cual el agua meteórica puede remplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de las fuentes termales o que son extraídos mediante pozos.

Fluido Geotermal

El fluido geotermal es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico, ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Esta agua a menudo contiene sustancias químicas disueltas y gases tales como CO_2 , H_2S , etc.

Campo geotérmico

Es una definición de carácter geográfico que usualmente corresponde a un área de actividad geotermal en la superficie de la tierra. En aquellos casos donde no hay actividad superficial este término puede utilizarse para indicar el área de la superficie bajo la cual hay un reservorio geotérmico (Axelsson and Gunnlaugsson, 2000).

Áreas termales

Las áreas termales son aquellas que a medida que desciende hacia la corteza de la tierra se obtiene un incremento de la temperatura a los diferentes niveles de profundidad.



Áreas no termales

Son aquellas que tienen un gradiente de temperatura entre 10 y 40°C/Km de profundidad.

Campo hipertermal húmedo

Campos geotérmicos con gradientes termales mucho mayor a los encontrados en las áreas no termales.

Gradiente geotérmico

Es el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología modernas, esto es, sobre 10.000 metros, el gradiente geotérmico promedio es alrededor de 25 a 30 °C/1km. Por ejemplo, a temperatura ambiente media anual de 15°C podemos razonablemente asumir una temperatura de 65 a 75°C a 2000 metros de profundidad, 90° a 105°C a 3000 metros de profundidad y así para otros miles de metros. Sin embargo, hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio. En áreas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellenada con sedimentos geológicamente “muy jóvenes”, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/km. Por otra parte, en algunas “áreas geotermiales” el gradiente es más de diez veces el valor promedio.

Pozo de producción

Es un acuífero profundo que se perfora en un campo geotérmico con el objetivo de obtener fluidos geotermiales y obtener de esta manera la energía que estos contienen para beneficio de la humanidad.

**Flujo bifásico**

Mezcla liquido-vapor, generalmente cuando se extrae el flujo másico de un pozo productor el cual es enviado a un separador.

Salmuera

Se define como agua con alta concentración de sal. Solución salina concentrada y caliente que circula entre las rocas de la corteza en un área con flujo geotérmico y que llega a enriquecerse de sustancias lixiviadas de esas rocas por ejemplo cloruro de Na, K y Ca generalmente tiene metales disueltos en cuyo caso constituye un importante intermediario en la formación de yacimientos minerales.

Pozo de reinyección

Acuífero perforado en los campos geotérmicos en el cual se inyectan las aguas geotérmicas residuales para mantener una producción de vapor relativa mente constante.

Prueba de inyección

Para verificar la efectividad de la reinyección en los pozos, la prueba de bombeo con fluido geotérmico en su fase líquida, se efectuará bombeando en el pozo este fluido a diferentes caudales, midiendo la presión en la boca de pozo y en el pozo a diferentes profundidades.

A través de pozos de reinyección, estos fluidos son reinyectados en las profundidades del reservorio geotérmico, para así alimentar al mismo sistema y contrarrestar el declive local de presión y caudal.



Permeabilidad

La capacidad de una roca para permitir que los fluidos pasen a través de él, es esencial para predecir el potencial de generación de energía geotérmica de agua caliente que circula a gran profundidad, conocido como **acuíferos**.

Presión litostática

Presión ejercida por la carga de las rocas suprayacentes. Es decir la presión en el interior de la tierra.

Plantas Binarias

Utilizan un fluido secundario, usualmente de carácter orgánico (principalmente n-pentano), que tiene un bajo punto de ebullición y una alta presión de vapor a bajas temperaturas, en comparación con el vapor de agua.

Red de tubería

Sistema de distribución de fluido dentro de tubos de uso industrial, de un punto determinado a otro que siguen una ruta específica, seleccionada previamente tomando en cuenta las condiciones topográficas del terreno.

Soporte

Un artefacto usado específicamente para sostener una porción del peso del sistema de tubería más cargas verticales sobrepuestas.

**Anclaje**

Un empotramiento rígido que provee sustancialmente una completa fijación para la traslación y rotación sobre los tres ejes de referencia. Los detalles de un anclaje pueden obtenerse de cada uno de los estándares de las compañías de soportes de tubería.

Espiras de expansión

Son dispositivos usados para incrementar la flexibilidad de la tubería. Las espiras proveen la distancia necesaria de tubería en dirección perpendicular para absorber la expansión térmica; ellas son más seguras comparadas con las juntas de expansión, pero toman más espacio.

Linestop (espira horizontal)

Las espiras horizontales (longitud de curva una u otra plana u horizontal) necesitan un poco más soportes, cuando se compara con espiras verticales en la porción de longitud de curva.

Loops (espira vertical)

Espira verticales asimétricas que se utilizan normalmente en un cruce de caminos. Los soportes en dirección vertical se proveen para soportar el peso de la gravedad.

Guías

Son estructuras que dirigen el movimiento de una tubería en la dirección que se desea. Las formas y tamaños de las guías varían mucho. Estas estructuras pueden estar ligadas a otros tipos de soportes de tuberías como las zapatas.



Sistema de bombeo

Consiste en un conjunto de elementos como son un equipo de bombeo que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, así también accesorios como válvulas, codos, etc. que cumplen las especificaciones de caudal y presión en los distintos sistemas y procesos.

2.2 Generalidades del sistema de reinyección en el campo geotérmico Momotombo.

Reinyección es el método utilizado para disponer/eliminar fluidos fuera de la superficie y/ o acuíferos someros del campo geotérmico. Existen dos tipos de reinyección que a continuación se mencionan:

- Reinyección dentro del campo.
- Reinyección fuera del campo.

En el campo geotérmico Momotombo se realizan distintos registros y pruebas en los pozos de reinyección que garantizan el buen funcionamiento y eficiencia del sistema de reinyección.

Registros y Pruebas en Pozos

- Perfilajes T- P - S.
- Registros geofísicos.
- Pruebas de Inyección.
- Pruebas de Interferencia.
- Pruebas de trazadores.
- Pruebas de producción.
- Entre otros.



Existen argumentos a favor y en contra de la reinyección que deben ser tomados en cuenta para la administración del reservorio geotérmico.

- **Ventajas**

- ✓ Mantiene la presión del reservorio.
- ✓ Beneficia en aspectos ambientales.

- **Desventajas**

- ✓ riesgo de retornos de agua fría a pozos de producción.
- ✓ disminución de recarga profunda.

Toda planta geotérmica debe cumplir con la ley internacional de geotermia que exige el 100% de reinyección. Ley con la que actualmente la planta geotérmica Momotombo cumple a cabalidad.

- Ley de Geotermia 19.657 → 100% de reinyección de fluidos.

Efectos de la reinyección

- Incrustación (scaling) - corrosión. (Calcita, sílice y anhidrita son los precipitados más comunes en pozos de reinyección).
- Sismicidad inducida.
- Cambios en manifestaciones superficiales (presión).
- Cambios en la temperatura y química de acuíferos-reservorios.

Soluciones

- Limpieza mecánica / Re perforar.
- Acidificación.
- Control de las condiciones de fluidos en superficie.

PROMEDIOS					
RMT2	RMT6	RMT15	RMT18	RMT30	RMT1
t/h					
43,95	454,52	135,16	149,53	65,91	161,90

Tabla 1: Caudales promedios de inyección.

2.3 Descripción del pozo RMT-1

El pozo de reinyección RMT-1 se encuentra localizado en la parte este del campo geotérmico, cerca de la zona de reinyección. Este pozo inicialmente fue utilizado como pozo de monitoreo nombrado como MT-01, para controlar los parámetros de temperatura y presión del reservorio; pero luego de realizarse estudios se decidió, en base a los resultados satisfactorios obtenidos de alta permeabilidad, que se utilizará como pozo reinyector, cambiando a su nombre actual RMT-1 y sumándose así al sistema de reinyección del campo geotérmico Momotombo.

Este pozo cuenta con los siguientes datos generales:

- Latitud: 1370.046 N
- Longitud: 550.317 E
- Elevación: 98.00 mts
- Profundidad: 1890 mts

Es importante destacar que el pozo RMT-1 fue perforado en dos fases; la primera fase inició en el mes de noviembre de año 1974 y finalizó en enero de 1975 alcanzando una profundidad de 795 mts; la segunda fase se inició 3 años más tarde en el mes de mayo de 1978, esta duró un mes y como resultado se obtuvo la profundidad máxima de 1890 mts.

A continuación se muestran dos perfiles del pozo RMT-1:

- El primer diagrama es el perfil característico de un pozo geotérmico con su respectiva profundidad, diámetros de la tubería o casing, del agujero o hueco abierto. Además con los datos de coordenadas y fechas de perforación.



CAMPO GEOTERMICO MOMOTOMBO

MT- 01



GENERALIDADES

COORDENADAS :

Latitud : 1370.046 N
Longitud : 550.317 E
Elevación : 98.00 m

EMPEZO :

13/11/74

TERMINO :

27/01/75

PROFUNDIDAD :

795.00 m

UTILIZACION ACTUAL :

Cerrado

PERFORACION :

FORAMINES

SUPERVISION :

ELC

WORKOVERS

1.- Inicia 16/01/77

Termina 27/01/77

Perfora : ENERGETICOS

Supervisa : C.E.C.I.

Profundidad : 795 m

2.- Inicia 20/05/78

Termina 22/06/78

Perfora : ENERGETICOS

Supervisa : C.E.C.I.

Profundidad : 1890 m

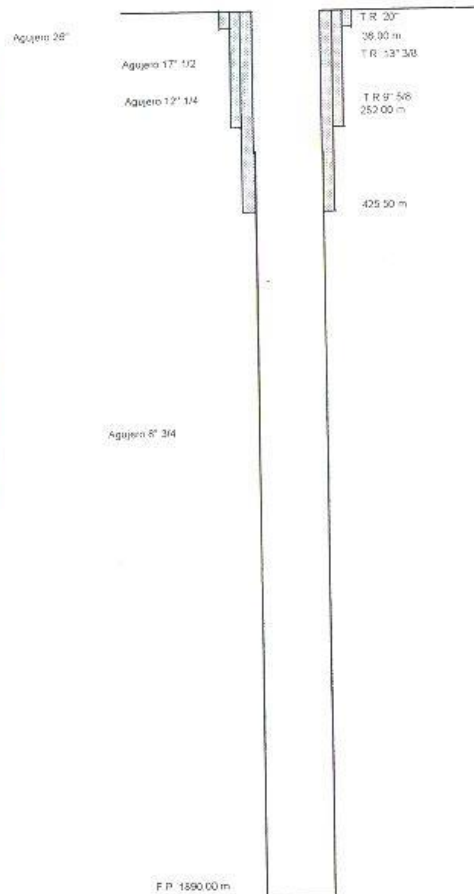


Figura 1: Perfil característico.

- El segundo diagrama es un perfil completo que brinda la información de los resultados obtenidos durante la perforación como: las pérdidas de lodo (refleja las profundidades donde se pierde lodo, que es el material utilizado durante la perforación), también nos muestra la posible zona de alimentación del pozo), la columna litológica (estudio geológico) y perfil de temperatura (muestra la variación de temperatura a distintas profundidades).

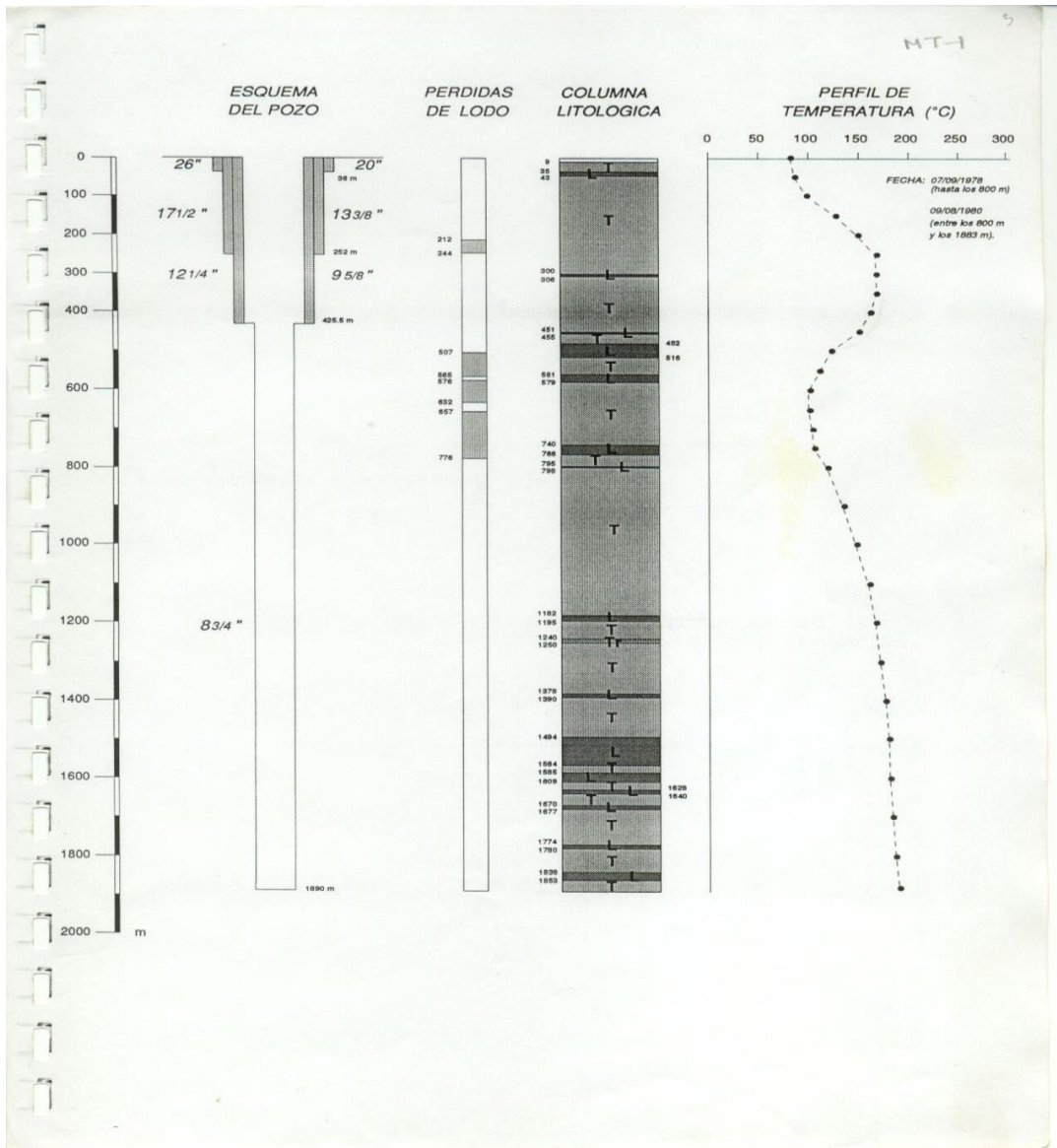


Figura 2: Perfil completo del pozo RMT-1



3. ANÁLISIS DE PRUEBA DE INYECCIÓN EN EL POZO RMT-1

3.1 Descripción de prueba de inyección en el pozo RMT-1

A continuación se describe el procedimiento de la prueba de inyección en el pozo R-MT1 realizada el día viernes 12 de abril del año 2013.

- 1) Se realiza registro de fondo con barra de peso, diámetro 1 $\frac{3}{4}$ " alcanzando 572 mts de profundidad.
- 2) Se programa herramienta K10 (descrita en página siguiente) para registrar datos cada 2 segundos.
- 3) Se conecta batería a las 07:59:38 hrs. Volt= 3.2
- 4) Apertura de válvula 3" de las 08:18:20 – 08:19:29 hrs.
- 5) Se activa Depth Box ó caja lectora de profundidad (se había cargado con antelación para trabajar sin conectarla a la batería de 12 voltios).
- 6) Se inicia descenso de 0 – 200 mts profundidad a una velocidad promedio de 28.5 mts/min tiempo: 08:24:50 – 08:32:22 hrs, (se espera 1 minuto).
- 7) Se continúa descenso de 200 – 550 mts profundidad a una velocidad promedio de 28 mts/min tiempo: 8:33:22 – 8:46:11 hrs (contador manual registra 551.5 mts profundidad).
- 8) Caudal de inyección= 145.88 Ton/hr – PW=0.50 bar g, se espera por 6 hrs de las 08:46:11 – 14:46:11 en esa condición.
- 9) De las 14:46:11 – 15:14:38 hrs se cambia caudal de inyección hacia el pozo QW=75.12 Ton/hrs – PW=0.40 bar g, se espera por una hora (15:14:38 – 16:14:38 hrs) en esta condición.
- 10) A las 16:14:38 hrs cierre del pozo, caudal de inyección hacia el pozo QW= 0.00 Ton/hrs se espera por una hora en esta condición (16:14:38 – 17:14:38 hrs).



- 11) De las 17:14:38 - 17:38 hrs ascenso de la herramienta K10 a la superficie, el Depth Box y el contador métrico manual registran profundidades similares.
- 12) Se procede a normalizar inyección hacia el pozo a condición inicial.
- 13) Se desconecta batería de la herramienta a las 18:48: 15 hrs para recuperar datos.

OBSERVACIONES: al recuperar datos del Depth Box se observa que registra ceros entre una profundidad y otra; al ascender registra profundidad de 549.32 – 549.36 mtrs hasta la superficie; no coinciden los tiempos con las profundidades. El año pasado que se realizó registro con el K10 en el pozo MT41 en la prueba de producción manifestó el mismo problema con el archivo de profundidad (herramienta programada a registrar datos cada 2 segundos).

Para la realización de esta prueba se utilizó la herramienta geotérmica K10, que a continuación describimos:

Descripción.

La herramienta geotérmica K10 HT EMR graba en memoria datos de presión y temperatura bajo la superficie y es manejado a través de una línea (cable sólido) de acero inoxidable o cualquier otro material. Está específicamente diseñada para operar en ambiente geotérmico hasta por seis horas a una temperatura de 315.6°C. La herramienta consiste básicamente de tres componentes principales: el ensamblaje inferior, el ensamblaje del sensor y el ensamblaje térmico (parte superior de la herramienta).

Propiedades:

- Tiene una sección electrónica robusta
- Sensor de presión piezo-resistivo.
- Una respuesta rápida del sensor de temperatura.

**Especificaciones.**Dimensiones

Diámetro..... 1.75”
Longitud..... 60”
Presión máxima de la cubierta exterior..... 5000psi

Presión..... hasta 5,000 psi
Precisión..... 0.024% E.T.
Resolución..... 0.0003%

Temperatura

Precisión..... 0.15% E.T.
Resolución..... 0.002%E.T.
Tiempo dentro del pozo..... 6 horas a 300°C

Electrónica

Alimentación..... una o dos batería “AA”
Número de datos que puede almacenar.....1, 400,000
Rango de tiempo mínimo de muestreo.....1 seg
Software..... Windows 98 o más reciente.

Desempeño.

La herramienta geotérmica K10 HT EMR está diseñada para trabajar y obtener datos de presión y temperatura en pozos geotérmicos. Ha sido probada en una variedad de escenarios de tiempo/temperatura, pero no en todos. Existe una relación compleja entre temperatura externa, temperatura interna y tiempo de permanencia en el pozo. Si existe alguna duda sobre la conveniencia de usar la herramienta en una prueba específica, por favor contactar a **KusterCompany**.



Figura 3: Caja lectora de profundidad (K10 DEPTH BOX).

3.2 Resultados de la prueba de inyección para el pozo RMT-1

En esta tabla se reflejan 45 datos de una cantidad de 19,458 datos registrados, como resultado de la información obtenida del K10 tomados cada 2 segundos.

mm/dd/yyyyTiempo	Presión(bar)	Delta(Horas)	Temperatura(°C)
12/04/2013 07:59	0.585	0	31.02
12/04/2013 07:59	0.582	0.000556	31.02
12/04/2013 07:59	0.577	0.001111	31.03
12/04/2013 07:59	0.584	0.001667	31.01
12/04/2013 07:59	0.579	0.002222	31.01
12/04/2013 07:59	0.58	0.002778	31
12/04/2013 07:59	0.581	0.003333	30.99
12/04/2013 07:59	0.583	0.003889	30.98
12/04/2013 07:59	0.58	0.004444	30.98
12/04/2013 07:59	0.586	0.005	30.98
12/04/2013 07:59	0.583	0.005556	30.98
12/04/2013 08:00	0.583	0.006111	30.97
12/04/2013 08:00	0.582	0.006667	30.98
12/04/2013 08:00	0.577	0.007222	30.98
12/04/2013 08:00	0.58	0.007778	30.98



12/04/2013 08:00	0.578	0.008333	30.97
12/04/2013 08:00	0.581	0.008889	30.96
12/04/2013 08:00	0.576	0.009444	30.96
12/04/2013 08:00	0.583	0.01	30.96
12/04/2013 08:00	0.58	0.010556	30.97
12/04/2013 08:00	0.573	0.011111	30.98
12/04/2013 08:00	0.579	0.011667	30.98
12/04/2013 08:00	0.583	0.012222	30.99
12/04/2013 08:00	0.585	0.012778	31.01
12/04/2013 08:00	0.582	0.013333	31.02
12/04/2013 08:00	0.581	0.013889	31.05
12/04/2013 08:00	0.578	0.014444	31.08
12/04/2013 08:00	0.582	0.015	31.09
12/04/2013 08:00	0.585	0.015556	31.07
12/04/2013 08:00	0.581	0.016111	31.06
12/04/2013 08:00	0.579	0.016667	31.06
12/04/2013 08:00	0.583	0.017222	31.06
12/04/2013 08:00	0.584	0.017778	31.06
12/04/2013 08:00	0.58	0.018333	31.09
12/04/2013 08:00	0.579	0.018889	31.11
12/04/2013 08:00	0.588	0.019444	31.12
12/04/2013 08:00	0.58	0.02	31.15
12/04/2013 08:00	0.584	0.020556	31.17
12/04/2013 08:00	0.605	0.021111	31.19
12/04/2013 08:00	0.627	0.021667	31.21
12/04/2013 08:00	0.657	0.022222	31.22
12/04/2013 08:01	0.648	0.022778	31.23
12/04/2013 08:01	0.654	0.023333	31.23
12/04/2013 08:01	0.656	0.023889	31.22

Tabla 2: Datos registrados de prueba de inyección.



3.3 Parámetros iniciales.

- Zona de alimentación del pozo: 550mts
- Temperatura estimada de reservorio: 173 °C
- Presión estimada de reservorio: 35.3 bar
- Radio del pozo: 0.11 mts
- Porosidad: 20% (0.2)
- Número de pasos de la prueba: 2 pasos (1ro de inyektividad a 2 diferentes caudales, y el 2do de recuperación de presión o fall off).
- Caudales de inyektividad:
 - ✓ 1er caudal de inyección: 145.88 ton/hrs
 - ✓ 2do caudal de inyección: 75.12 ton/hrs

3.4 Modelos y parámetros de la prueba de inyección.

Durante una prueba realizada en un pozo, la respuesta de la presión, debido a un cambio en la inyección o producción se mide para determinar una serie de propiedades relacionadas con el depósito circundante. Esto se realiza comúnmente mediante la creación de un modelo matemático para la respuesta transitoria de la presión en la cavidad y el depósito, debido a un cambio en escalón instantáneo en la inyección (o producción).

El modelo matemático depende de los valores característicos del depósito y de la sintonización de estos valores, tal que, la respuesta modelada ajusta los datos observados, por tanto uno puede determinar las propiedades características del depósito.

Este es un problema de modelado inverso y, como muchos otros problemas en ingeniería de yacimientos, inherentemente produce resultados un tanto ambiguos. Sin embargo, mediante la realización cuidadosa de la prueba,



teniendo en cuenta el modelo conceptual del depósito y mediante el análisis asistido por ordenador, la ambigüedad de los resultados puede ser minimizado.

Por otra parte, una estimación de error en los parámetros inferidos se puede obtener a través de la regresión no lineal proporcionada por el método asistido por ordenador. El análisis de la prueba de la inyección se realiza mediante el WellTester software que ha sido desarrollado en la Islandia GeoSurvey (ISOR) desde 2006. Este es un software basado que permite un análisis de los pasos en una manera relativamente fácil y presenta los resultados en forma gráfica y en las tablas.

Definiciones de los parámetros del yacimiento

Lo que sigue es una breve y simplificada discusión sobre el significado de cada uno de los parámetros que se presentan en este informe. Se hace un intento para describir el significado intuitivo de cada parámetro y en algunos casos también se le da una interpretación física.

Parámetros iniciales:

La presión del yacimiento estimado (P_{est}) y la temperatura del yacimiento estimado (T_{est}) son estimaciones medias para la parte del depósito que está siendo investigado en el pocillo de ensayo. Estos valores se utilizan para calcular valores aproximados de la viscosidad dinámica del depósito de líquido y la compresibilidad total de la matriz de la roca y el fluido.

Radio del pozo: es el radio medio del pozo en la profundidad del yacimiento, en metros.



Viscosidad dinámica del depósito de líquido (μ): es la viscosidad media estimada del fluido en las condiciones del yacimiento. En los casos en que el fluido está en dos fases la viscosidad promedio puede tomarse como la media armónica de las dos fases ponderados por la fracción de masa de cada fase.

Compresibilidad total (ct): describe la capacidad del fluido y la roca del yacimiento para comprimir o expandir como una función de la presión. Las formulaciones para la compresibilidad serán ligeramente diferentes en función de la física del fluido y el depósito.

Porosidad (ϕ): es la fracción de volumen de la roca que es capaz de mantener el agua.

Parámetros de prueba de pozos

La transmisividad (T), sobre la base de flujo volumétrico, tiene la unidad SI ($m^3/Pa \cdot seg$). Se describe la capacidad del depósito para transmitir el fluido, por lo tanto, afecta en gran medida el gradiente de presión entre la cavidad y el depósito. Su formulación es física (kh / μ), donde k es la permeabilidad efectiva del depósito, h es el espesor del yacimiento y μ es la viscosidad dinámica del fluido. La transmisividad puede variar de algunos órdenes de magnitud.

Coeficiente de almacenamiento (S): tiene la unidad SI [$m^3 / (Pa \cdot m^2)$] ó [m / Pa] y define el volumen de líquido almacenado en el depósito, por unidad área, por unidad de aumento de la presión. Por lo tanto, tiene un gran impacto en la rapidez con la onda de presión puede viajar dentro del depósito. La formulación general de coeficiente de almacenamiento es $S = \phi \cdot ct \cdot h$, donde ϕ es el promedio de la porosidad del yacimiento, ct es la compresibilidad total de la roca y el depósito de líquido y h es el espesor del yacimiento. Coeficiente de almacenamiento varía mucho entre los tipos de depósito (es decir, líquido,



dominado vs bifásica o seco-vapor), debido a su dependencia de la compresibilidad del fluido (Grant et al, 1982). Los valores comunes de yacimientos geotérmicos líquido dominados son alrededor de $10^{-8} \text{ [m}^3/ (\text{Pa} \cdot \text{m}^2)]$, mientras que los embalses de dos fases pueden tener valores en el orden de $10^{-5} \text{ [m}^3/ (\text{Pa} \cdot \text{m}^2)]$.

Factor de la piel (s): es una variable usada para cuantificar la permeabilidad del volumen que rodea inmediatamente el pozo. Este volumen es a menudo afectada por las operaciones de perforación, siendo bien dañado (por ejemplo, debido a los recortes de perforación que obstruyen las fracturas) o estimulada (por ejemplo, debido a la amplia fractura alrededor del pozo). Para los pozos dañados el factor de la piel es positivo y para los pozos estimulados es negativo. El factor de la piel en los depósitos geotérmicos islandesa es comúnmente entre -3 y -1, aunque los valores pueden variar desde aproximadamente -5 a 20. El factor de la piel también puede ser descrito en términos del radio efectivo del pozo, es decir, el radio aparente del pozo causada por el efecto de la piel.

El radio efectivo se da por $r_{effRW} = e^{-s}$ donde RW es el radio del pozo medido (Horne, 1995). Debe tenerse en cuenta que el factor de la piel y el coeficiente de almacenamiento son bastante correlacionadas en modelos de prueba de pozos, por lo tanto, la precisión relativa de cada parámetro se reducirá cuando ambos están incluidos.

Almacenamiento del pozo (C): es una propiedad que da cuenta de la diferencia entre la tasa de flujo del cabezal de pozo, y velocidad de flujo (es decir, el flujo dentro o fuera de la formación real). Efectos de almacenamiento del pozo pueden ocurrir de varias maneras, pero comúnmente, mediante el cambio del nivel del líquido y la expansión del fluido.

En la inyección probar la causa más dominante de almacenamiento del pozo es el cambio de nivel de líquido. El efecto de almacenamiento es causado por el volumen en el pozo en sí siendo vaciado o llenado. En el caso de la expansión



del fluido considerar una prueba de caída de presión. Cuando el pozo se abre primero en el flujo, la presión en el pozo cae y el fluido en el pozo se expande proporcionando el volumen de producción inicial (Horne, 1995). Típicamente, bajo condiciones líquidas monofásicas el almacenamiento del pozo, debido a la expansión del fluido, es insignificante. Sin embargo, en un pozo geotérmico donde los fluidos del pozo cambian de una única fase de líquido a un vapor de agua el efecto de expansión de dos fases pueden ser muy significativos.

Radio de investigación (re): es la distancia aproximada a la que la respuesta de la presión del pozo se convierte en indetectable. Por lo tanto, este radio define el área alrededor del pozo se está investigando, aunque el valor del parámetro debe ser visto más cualitativamente. Cuando se observan las condiciones de contorno en los datos, la distancia aproximada hasta el límite será definir el radio de la investigación.

El índice de inyektividad (II): se utiliza a menudo como una estimación aproximada de la conectividad del pozo al depósito circundante. Aquí se da en las unidades de [(Lts / seg) /bar] y se define como el cambio en la tasa de flujo de inyección dividido por el cambio en la presión del yacimiento estabilizado.

$$II = | \Delta Q / P |$$

Aquí $\Delta Q = Q_f - Q_i$ y $P = P_f - P_i$ donde i se refiere al valor inicial y f se refiere al valor final. En Well Tester los valores de presión utilizados para calcular II se toman de la respuesta modelada, no de los datos reales recogidos.

**Parámetros deducidos:**

Dos parámetros específicos de interés en la física del depósito se pueden deducir mediante la combinación de las estimaciones de los parámetros iniciales y los resultados de las pruebas así. Los parámetros estimados en el pocillo de ensayo son la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) y teniendo en cuenta la porosidad (ϕ), compresibilidad total de (c_t) y la viscosidad dinámica (μ) se pueden estimar el espesor del yacimiento (h) y la permeabilidad efectiva (k) de la siguiente manera:

$$h = S / (\phi c_t) \text{ y } k = T \mu / h$$

Sin embargo, cabe señalar que el error en estas estimaciones se ve influenciada por el error combinada en los parámetros subyacentes, por lo que como regla general, los resultados sólo deben considerarse como una comprobación cruzada cualitativa sobre los resultados de la prueba de pozo.

La permeabilidad efectiva (k) es una medida de la capacidad de la roca del yacimiento para transmitir fluido. Permeabilidad tiene las unidades del SI [m^2], pero es comúnmente conocido el uso de unidades de Darcy, es decir, $1\text{D} \approx 10^{-12} \text{ m}^2$. La Permeabilidad en depósitos geotérmicos es generalmente del orden de 1 a 100 mD (millidarcy), es decir, $(10)^{-15}$ a $(10)^{-13} \text{ m}^2$.

Espesor del yacimiento (h) es el espesor estimado de la formación que se está intercambiando activamente fluido con el pozo.

3.5 Tablas de Resultados de Prueba de inyección.

Modelo de Prueba de Pozo	
Reservorio:	Homogéneo
Límite:	Infinito
Pozo de:	Piel constante
Tipo de pozo:	Pozo de almacenamiento

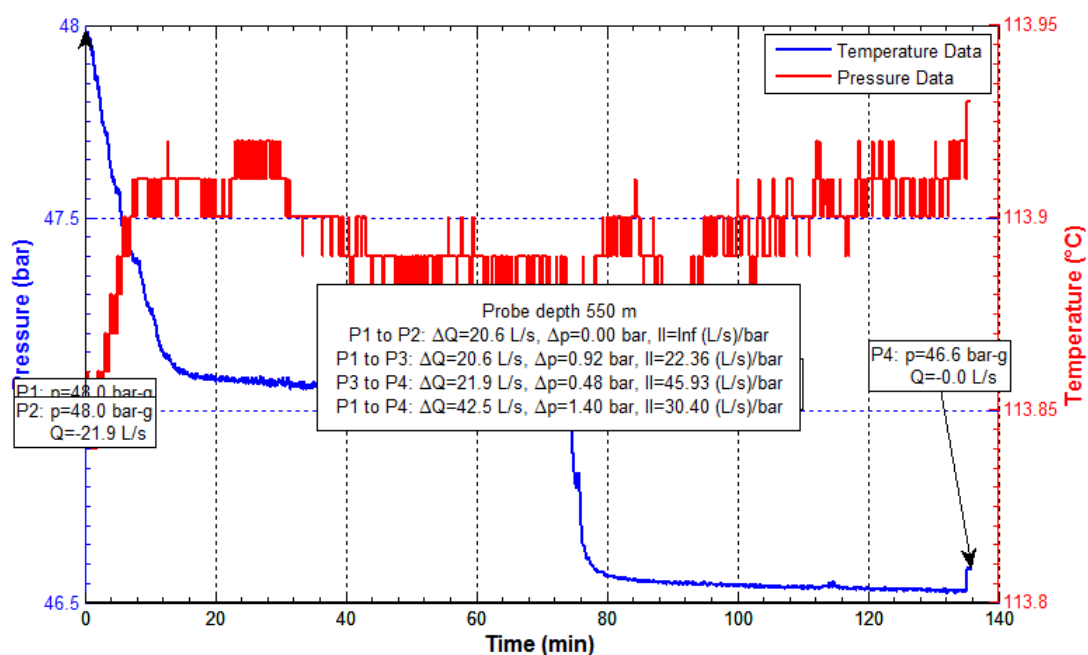
Tabla 3: Parámetros iniciales del pozo.

Nombre de Parámetro	Valor de Parámetro	Borde Inferior 95% C.I.	Borde Superior 95% C.I.	CV %	Unidad de Parámetro
Transmisividad (T)	2.81E-07	1.98E-07	3.64E-07	14.7777488	m ³ /(Pa*s)
Coeficiente de almacenamiento (S)	2.99E-11	-3.08E-10	3.67E-10	564.333065	m ³ /(Pa*m ²)
Factor de piel(s)	-4.74342789	-9.798880263	0.312024483		-
Almacenamiento del Pozo (C)	3.80E-05	2.80E-05	4.80E-05	13.1764495	m ³ /Pa
Índice de inyectividad (II)	30.55171823				(l/s)/bar

Tabla 4: Parámetros de prueba de pozo.

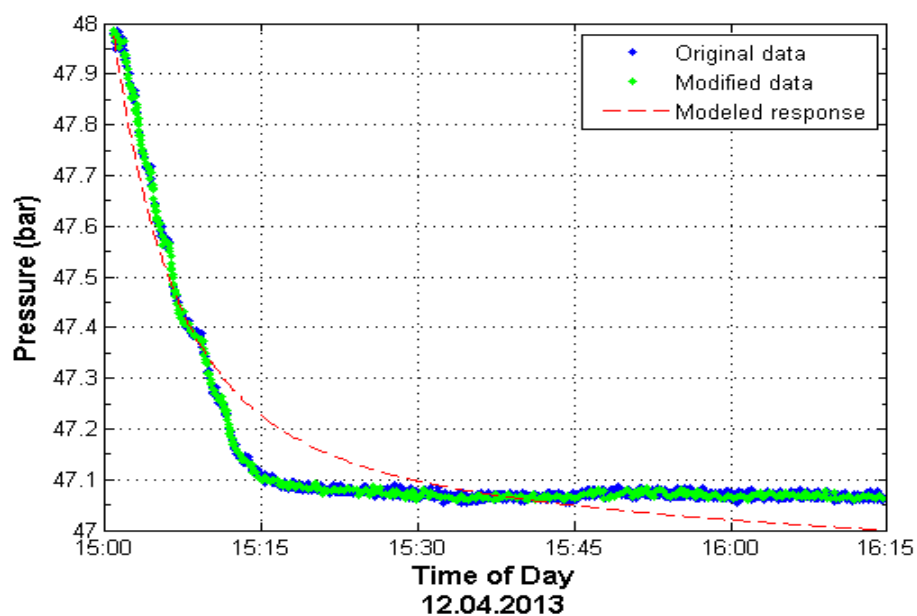
Parámetros deducidos		
Nombre de Parámetro	Valor de Parámetros	Unidad de Parámetros
Espesor de Reservorio (h)	0.928662551	m
Permeabilidad efectiva (k)	4.75E-11	m ²

Tabla 5: Parámetros deducidos.

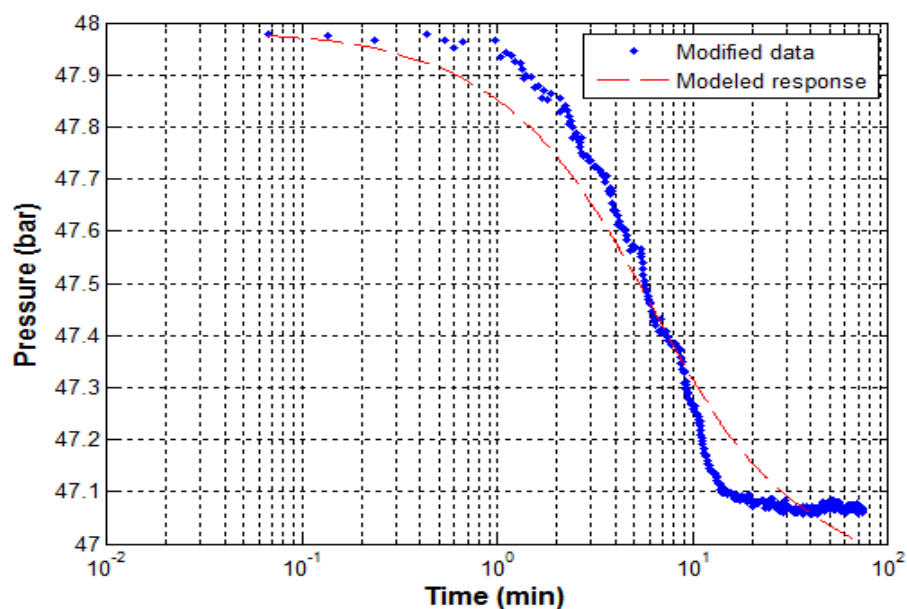


Grafica 1: Resumen de prueba de inyección.

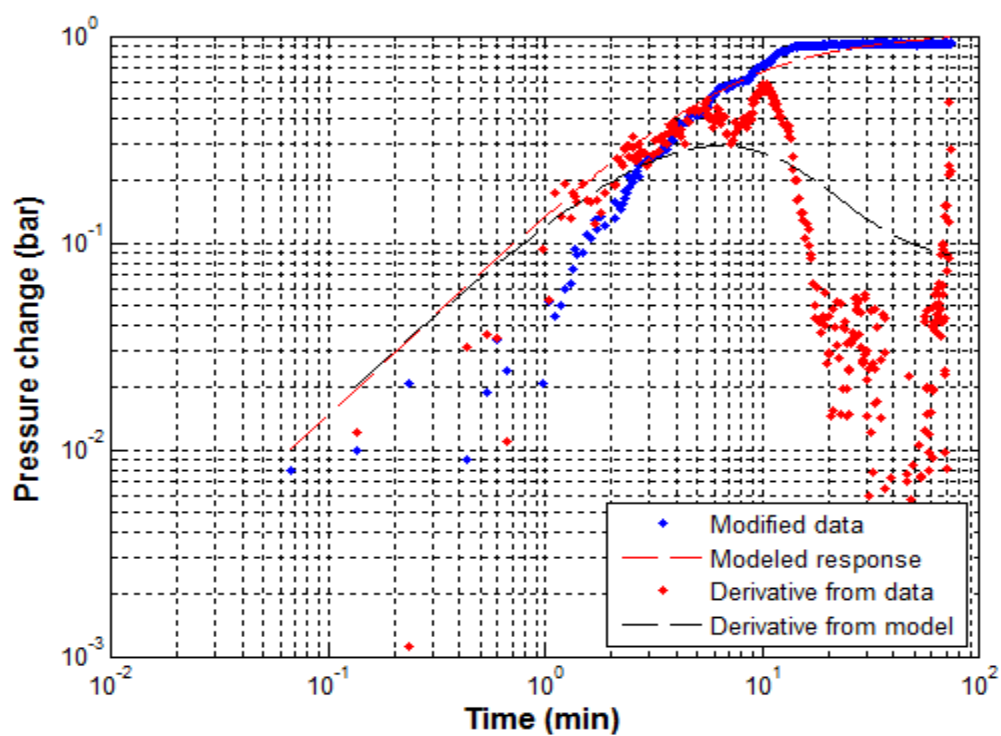
3.6 Modelo del primer paso de Prueba de inyección.



Gráfica 2: Curva de presión del paso nr. 1



Gráfica 3: curva de presión modificada para el paso nr 1.

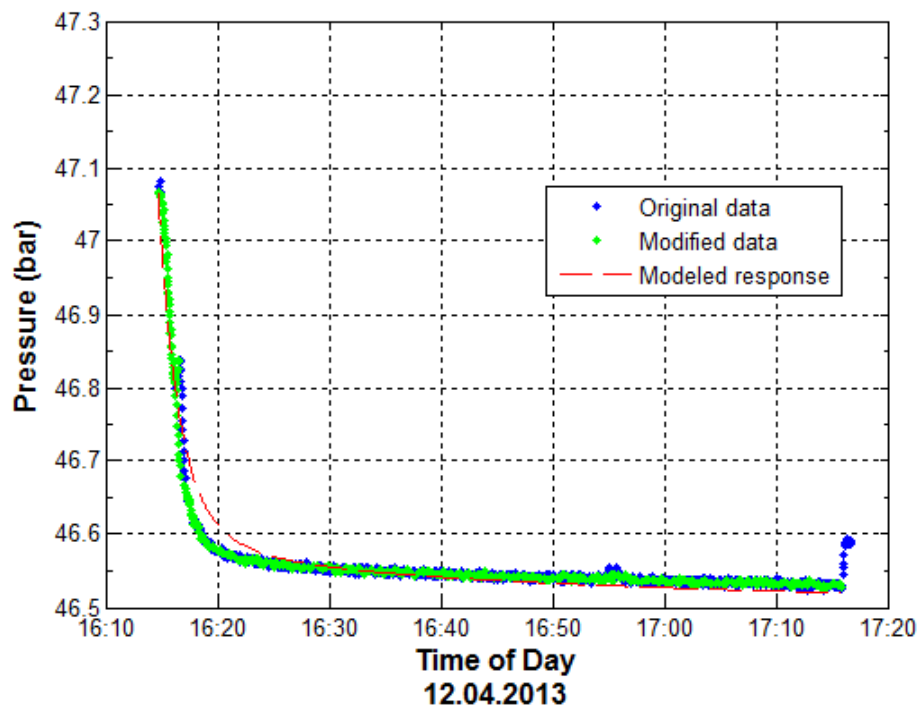


Gráfica 4: Curva de derivada de presión para el paso nr 1.

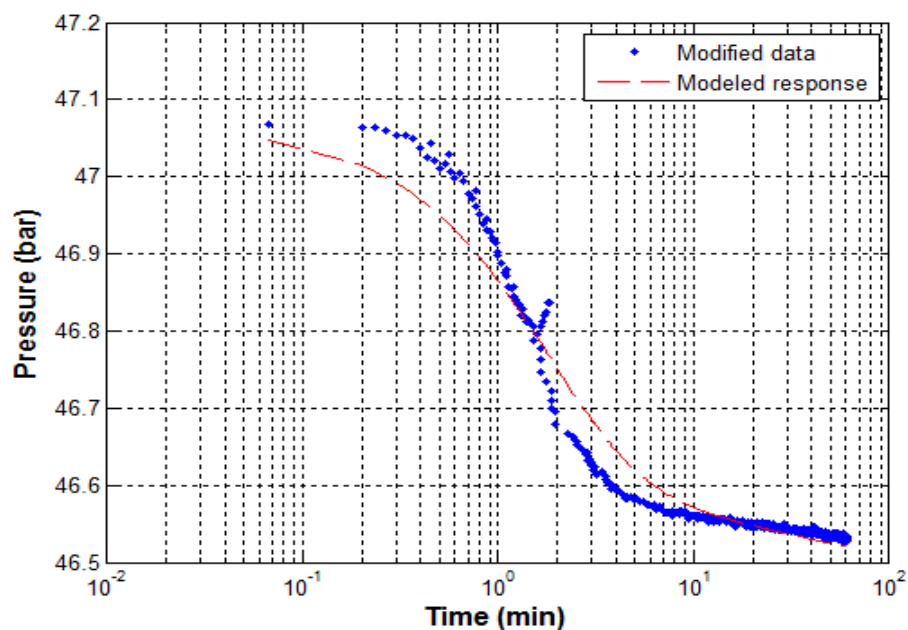
Nombre de Parámetro	Valor de Parámetro	Límite Inferior 95% C.I.	Límite Superior 95% C.I.	CV [%]	Unidad de Parámetro
Transmisividad (T)	$2.29 \cdot 10^{-7}$	$1.76 \cdot 10^{-7}$	$2.81 \cdot 10^{-7}$	11.4	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
Coefficiente de almacenamiento (S)	$1.24 \cdot 10^{-11}$	$-9.92 \cdot 10^{-11}$	$1.24 \cdot 10^{-10}$	450.6	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2)$
Factor de Piel (s)	-4.74	-8.79	-0.69	-	-
Almacenamiento del Pozo (C)	$8.11 \cdot 10^{-5}$	$7.46 \cdot 10^{-5}$	$8.77 \cdot 10^{-5}$	4.0	m^3/Pa
Indice de Inyectividad (II)	20.89				(L/s)/bar

Tabla 6: Parámetros obtenidos del modelo del paso nr 1 de la prueba de inyección.

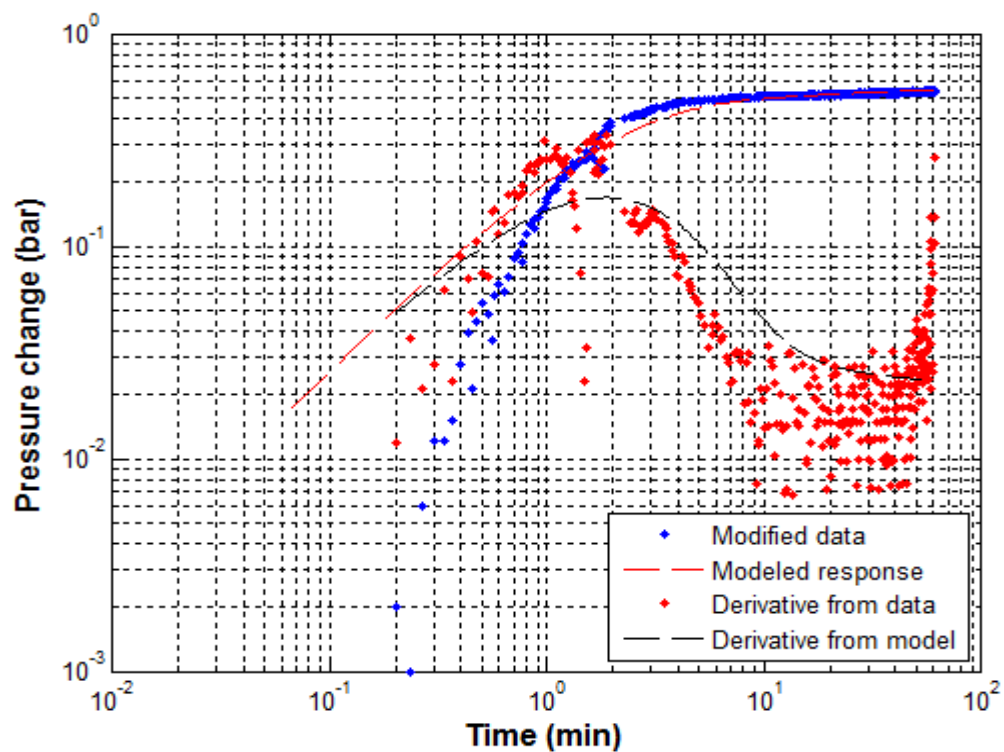
3.7 Modelo del segundo paso de Prueba de inyección.



Grafica 5: Curva de presión del paso nr. 2



Gráfica 6: curva de presión modificada para el paso nr 2.

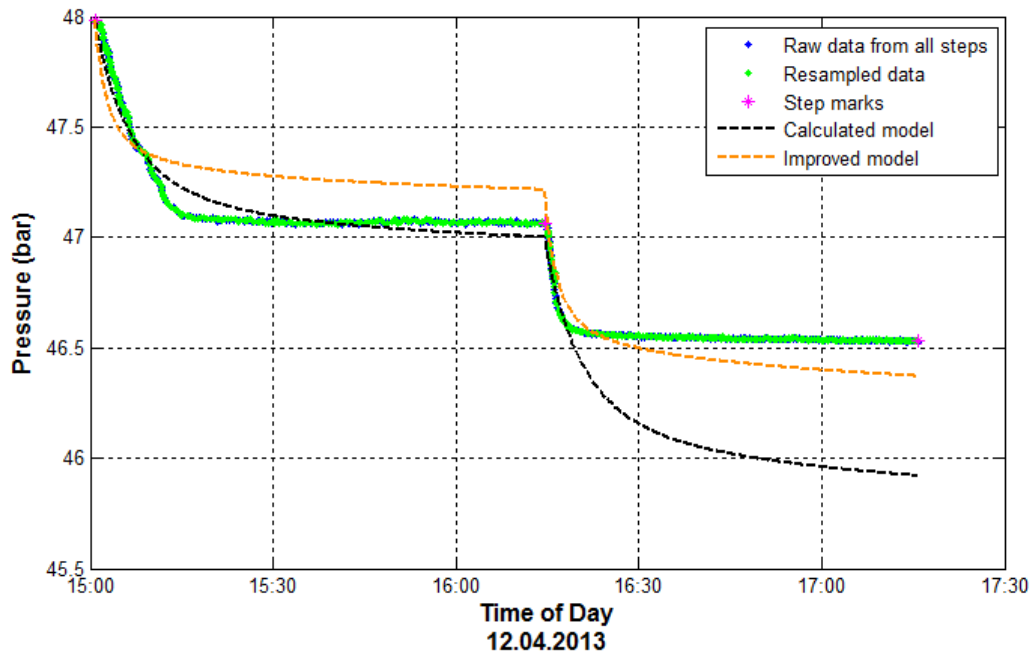


Gráfica 7: Curva de derivada de presión para el paso nr 2.

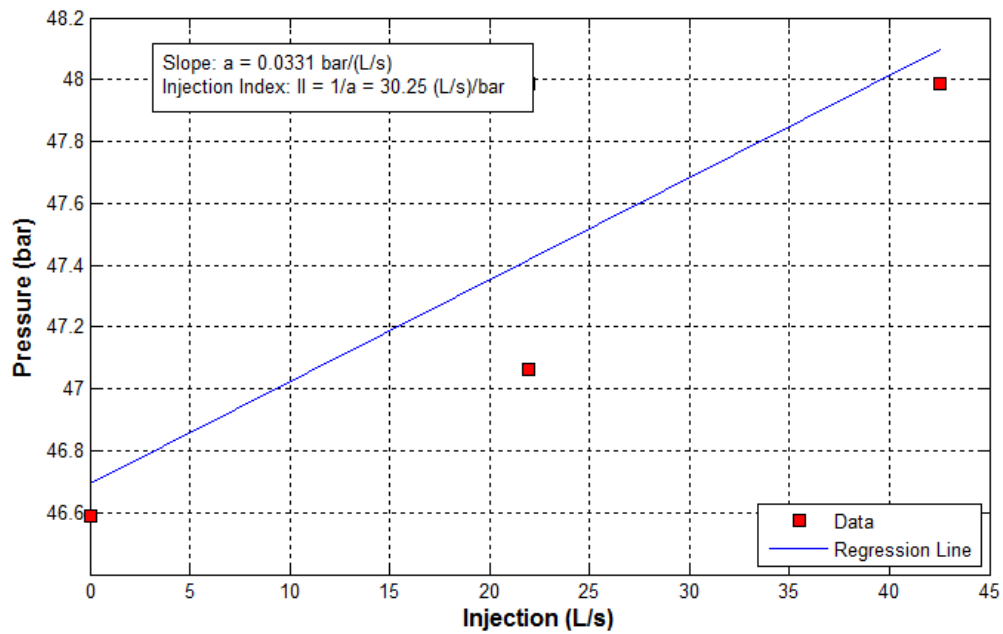
Nombre de Parámetro	Valor de Parámetro	Borde Inferior 95% C.I.	Borde Superior 95% C.I.	CV [%]	Unidad de Parámetro
Transmisividad(T)	$8.02 \cdot 10^{-7}$	$6.62 \cdot 10^{-7}$	$9.42 \cdot 10^{-7}$	8.7	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
Coefficiente de Almacenamiento (S)	$1.69 \cdot 10^{-11}$	$-5.78 \cdot 10^{-11}$	$9.17 \cdot 10^{-11}$	220.7	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2)$
Factor de Piel (s)	0.46	-0.13	1.06	-	-
Almacenamiento del Pozo (C)	$4.86 \cdot 10^{-5}$	$4.61 \cdot 10^{-5}$	$5.11 \cdot 10^{-5}$	2.6	m^3/Pa
Indice de Inyectividad (II)	40.21				(L/s)/bar

Tabla 7: Parámetros obtenidos del modelo del paso nr 2 de la prueba de inyección.

3.8 Modelo de todos los pasos de la Prueba de inyección.



Gráfica 8: Modelado de todos de los pasos de la prueba de inyección.



Gráfica 9: Índice de inyectividad

Nombre de Parámetro	Valor de Parámetro	Borde Inferior 95% C.I.	Borde Superior 95% C.I.	CV [%]	Unidad de Parámetro
Transmisividad (T)	$2.81 \cdot 10^{-7}$	$1.98 \cdot 10^{-7}$	$3.64 \cdot 10^{-7}$	14.8	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
Coeficiente de Almacenamiento (S)	$2.99 \cdot 10^{-11}$	$-3.08 \cdot 10^{-10}$	$3.67 \cdot 10^{-10}$	564.3	$\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2)$
Factor de Piel (s)	-4.74	-9.80	0.31	-	-
Almacenamiento del Pozo (C)	$3.80 \cdot 10^{-5}$	$2.80 \cdot 10^{-5}$	$4.80 \cdot 10^{-5}$	13.2	m^3/Pa
Indice de inyectividad (II)	30.55				(L/s)/bar

Tabla 8: Parámetros obtenidos del modelo del paso nr 2 de la prueba de inyección.

3.9 Cálculo del caudal de inyección y presión de cabezal adecuados para el Pozo RMT-1.

Caudal de Inyección (t/hrs)	200	250	300	350	400	500	550
Profundidad de la zapata (m)	425.5	425.5	425.5	425.5	425.5	425.5	425.5
Densidad (kg/m ³)	951	951	951	951	951	951	951
Temperatura (°C)	110	110	110	110	110	110	110
Sobre presión permitida	0	0	0	0	0	0	0
Índice de inyectividad (l/s)/bar.	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5
Caudal inyectado (m ³ /hrs)	210.3	262.9	315.5	368	420.6	525.8	578.3
Caudal inyectado (l/s)	58.4	73	87.6	102.2	116.8	146	160.6
Factor de presión litostática (psi/ft)	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
Presión estática en la zapata del casing (bar.)	35	35	35	35	35	35	35
Presión desarrollada por la inyección (bar.)	1.92	2.39	2.87	3.35	3.83	4.79	5.27
Presión estática en la zapata con el pozo lleno (bar.)	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7
Pérdida por fricción en el casing (bar.)	0.044	0.069	0.100	0.135	0.177	0.276	0.334
Perdida por fricción en el agujero (bar.)	0.025	0.039	0.057	0.077	0.101	0.157	0.190
Profundidad de inyección (m)	550	550	550	550	550	550	550
PRESIÓN EN EL CABEZAL (bar.)	-2.71	-2.2	-1.67	-1.13	-0.59	0.52	1.09
Presión litostática (bar.)	70.6	70.6	70.6	70.6	70.6	70.6	70.6
Presión máxima de cabezal (bar.)	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9

Tabla 9: Resultados de pérdida de presión en cabezal del pozo RMT-1.



Diámetro del casing (in)	9.625	9.625	9.625	9.625	9.625	9.625	9.625
Rugosidad (ft)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Factor de fricción	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.04E-02
Viscosidad (lbm/s-ft)	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04
Densidad (lb/ft3)	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37
Caudal (ft3/s)	2.06	2.57	3.09	3.6	4.12	5.15	5.66
Velocidad (ft/s)	4.07	5.09	6.11	7.13	8.15	10.19	11.20
Numero de Reynolds	1.15E+06	1.44E+06	1.72E+06	2.01E+06	2.30E+06	2.87E+06	3.16E+06
Gradiente de Fricción (psi/ft)	4.59E-04	7.18E-04	1.03E-03	1.41E-03	1.84E-03	2.87E-03	3.47E-03
Pérdida de presión en casing (psi.)	0.64	1.00	1.44	1.96	2.57	4.01	4.85

Tabla 10: Resultados de pérdida de presión en el casing.



Diámetro del agujero (in)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
Rugosidad (ft)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Factor de fricción	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02	1.09E-02
Viscosidad (lbm/s-ft)	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04	1.69E-04
Densidad (lb/ft3)	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37	59.37
Caudal (ft3/s)	2.06	2.57	3.09	3.6	4.12	5.15	5.66
Velocidad (ft/s)	5.22	6.53	7.84	9.14	10.45	13.06	14.37
Número de Reynolds	1.30E+06	1.62E+06	1.95E+06	2.27E+06	2.60E+06	3.25E+06	3.57E+06
Gradiente de Fricción (psi/ft)	8.93E-04	1.40E-03	2.01E-03	2.73E-03	3.57E-03	5.58E-03	6.75E-03
Pérdida de presión en el agujero (psi.)	0.36	0.57	0.82	1.12	1.46	2.28	2.76

Tabla 11: Resultados de pérdida de presión en el agujero.

Presión de cabezal = Presión estática en la zapata del casing + Sobre presión permitida + presión desarrollada por la inyección - presión estática en la zapata con el pozo lleno + pérdida por fricción en el casing + pérdida por fricción en el agujero.

P_H = Presión de cabezal

P_{e1} = Presión estática en la zapata del casing

S_p = Sobre presión permitida

P_i = Presión desarrollada por la inyección

P_{e2} = Presión estática en la zapata con el pozo lleno

h_{fc} = Pérdida por fricción en el casing

h_{fa} = Pérdida por fricción en el agujero

$$P_H = P_{e1} + S_p + P_i - P_{e2} + h_{fc} + h_{fa}$$

Para aplicar esta fórmula basada en la hidrostática es necesario realizar los cálculos pertinentes de los parámetros a utilizar que se muestran en las siguientes figuras, donde la figura de lado izquierdo muestra el diagrama del pozo estático, es decir cuando no se le está inyectando salmuera; mientras que la figura de lado derecho refleja cuando el pozo se encuentra lleno de salmuera.

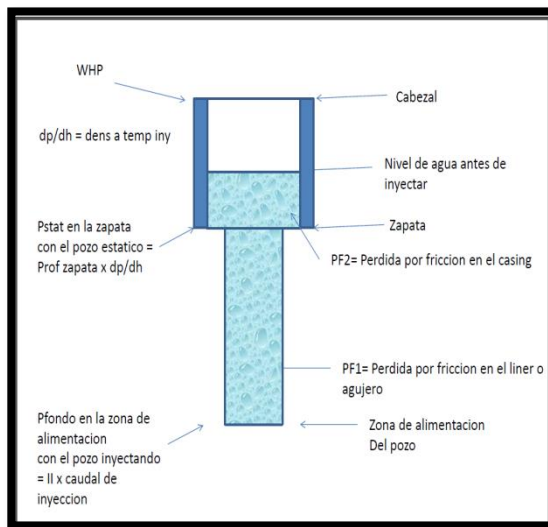


Figura 4: Pozo estático

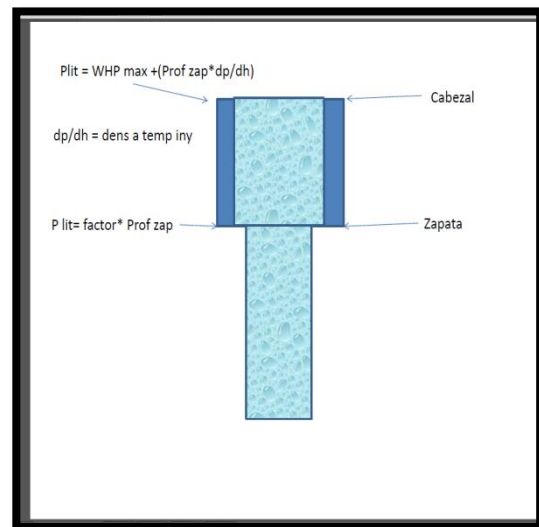


Figura 5: Pozo lleno

Es necesario iterar con valores de diferentes caudales para calcular la presión de cabezal correspondiente a cada valor iterado, decidimos iniciar con caudal de 200 ton/hrs ya que actualmente se inyectan 160 ton/hrs aproximadamente; variar caudal cada 50 ton/hrs hasta alcanzar la máxima presión de cabezal permitida de trabajo en la planta geotérmica con valor de 7 Bar.



A continuación realizamos los cálculos correspondientes a 500 ton/hrs.

Entonces tenemos:

- ✓ $Q = 500 \text{ ton/hr}$, 146 l/s , $5.15 \text{ ft}^3/\text{s}$
- ✓ Temperatura de salmuera = 110°C
- ✓ Densidad = 951 kg/m^3 , 59.37 lbm/ft^3 . (De tabla de propiedades físicas de agua A5a (Crane)).
- ✓ Profundidad de la zapata = 425.5 mts , 1396 ft (este valor se toma del perfil del pozo, exactamente a la profundidad donde se da el cambio de diámetro del casing al diámetro del agujero o hueco abierto).
- ✓ Sobre presión permitida
 $S_p = 0$ (usualmente es cero)
- ✓ Índice de inyectividad = 30.5 (l/s)/bar (valor tomado de resultados del análisis de prueba de inyección).
- ✓ Factor de presión litostática = 0.733 psi/ft (factor estándar).
- ✓ Presión estática en la zapata del casing
 $P_{e1} = 35 \text{ bar}$ (tomado de un registro estático del pozo RMT-1 a 425.5 mts que es la profundidad de la zapata).



- ✓ Presión estática en la zapata con el pozo lleno

P_{e2} = Profundidad de la zapata * Densidad a temperatura de inyección

$$P_{e2} = 1396 \text{ ft} * 59.37 \text{ lb/ft}^3$$

$$P_{e2} = 82880 \text{ lb/ft}^2 * \frac{\text{lb/in}^2}{144 \text{ lb/ft}^2}$$

$$P_{e2} = 575.5 \text{ lb/in}^2 * \frac{\text{bar}}{14.5 \text{ lb/in}^2}$$

$$P_{e2} = 39.7 \text{ bar}$$

- ✓ Presión desarrollada por la inyección:

$$P_i = \frac{\text{Caudal de inyección}(\frac{l}{s})}{\text{Indice de inyectividad}(\frac{l}{s})/\text{bar}}$$

$$P_i = \frac{146(\frac{l}{s})}{30.5(\frac{l}{s})/\text{bar}}$$

$$P_i = 4.79 \text{ bar}$$

Para cálculos de presión en el casing:

- ✓ Diámetro del casing = 9.625 in, 0.8 ft
- ✓ Rugosidad de tubería = 0.01ft
- ✓ Factor de fricción = 1.04E-02
- ✓ Viscosidad = 1.69E-04 lbm/s-ft
- ✓ Velocidad = 10.19 ft/seg



$$V = Q/A$$

$$V = (5.15 \text{ ft}^3/\text{s}) / (\pi(9.625/24)^2)$$

$$V = 10.19 \text{ ft/seg}$$

✓ Número de Reynolds = $2.87\text{E}+06$

$$\text{Número de Reynolds} = ((\text{Diámetro del casing (ft)} * \text{densidad (lbm/ft}^3) * \text{velocidad (ft/seg)}) / \text{viscosidad (lbm/s-ft)})$$

$$\text{Número de Reynolds} = (0.8 \text{ ft} * 59.37 \text{ lbm/ft}^3 * 10.19 \text{ ft/seg}) / 1.69\text{E}-04 \text{ lbm/s-ft}$$

$$\text{Número de Reynolds} = 2.87\text{E}+06$$

✓ Gradiente de Fricción = $2.87\text{E}-03 \text{ psi/ft}$

$$\text{Gradiente de Fricción} = 0.00043 * \text{densidad (lbm/ft}^3) * \text{Factor de fricción} * \text{velocidad}^2 (\text{ft}^2/\text{seg}^2) / \text{Diámetro del casing (in)}$$

$$\text{Gradiente de Fricción} = (0.00043 * 59.37 * 1.04\text{E}-02 * (10.19)^2) / 9.625$$

$$\text{Gradiente de Fricción} = 2.87\text{E}-03 \text{ psi/ft}$$

✓ Pérdida de presión en el casing = $4.01(\text{psi})$

$$\text{Pérdida de presión en el casing} = \text{Gradiente de Fricción (psi/ft)} * \text{Profundidad de la zapata (ft)}$$

$$\text{Pérdida de presión en el casing} = 2.87\text{E}-03 \text{ psi/ft} * 1396 \text{ ft}$$

$$\text{Pérdida de presión en el casing} = 4.01 (\text{psi.g})$$

✓ Pérdida por fricción en el casing = 0.276 bar

$$\text{Pérdida por fricción en el casing} = \text{Pérdida de presión en el casing (psi)} / 14.5$$

$$\text{Pérdida por fricción en el casing} = 0.276 \text{ bar}$$

**Para cálculos de presión en el agujero:**

- ✓ Diámetro del agujero o hueco abierto = 8.5 in, 0.7083 ft
- ✓ Rugosidad de tubería = 0.01ft
- ✓ Factor de fricción = 1.09E-02
- ✓ Viscosidad = 1.69E-04 lbm/s-ft
- ✓ Velocidad = 13.06 ft/seg

$$V = Q/A$$

$$V = (5.15 \text{ ft}^3/\text{s}) / (\pi(8.5/24)^2)$$

$$V = 13.06 \text{ ft/seg}$$

- ✓ Número de Reynolds = 3.25E+06

$$\text{Número de Reynolds} = ((\text{Diámetro del casing (ft)} * \text{densidad (lbm/ft}^3) * \text{velocidad (ft/seg)}) / \text{viscosidad (lbm/s-ft)})$$

$$\text{Número de Reynolds} = (0.7083\text{ft} * 59.37 \text{ lbm/ft}^3 * 13.06 \text{ ft/seg}) / 1.69\text{E-}04 \text{ lbm/s-ft}$$

$$\text{Número de Reynolds} = 3.25\text{E+}06$$

- ✓ Gradiente de Fricción = 5.58E-03 psi/ft

$$\text{Gradiente de Fricción} = 0.00043 * \text{densidad (lbm/ft}^3) * \text{Factor de fricción} * \text{velocidad}^2 (\text{ft}^2/\text{seg}^2) / \text{Diámetro del casing (in)}$$

$$\text{Gradiente de Fricción} = (0.00043 * 59.37 * 1.09\text{E-}02 * (13.06)^2) / 8.5$$

$$\text{Gradiente de Fricción} = 5.58\text{E-}03 \text{ psi/ft}$$



✓ Pérdida de presión en el casing = 2.28(psi)

Pérdida de presión en el casing = Gradiente de Fricción (psi/ft) * Profundidad de la zapata (ft)

Pérdida de presión en el casing = 5.58E-03 psi/ft * 1396 ft

Pérdida de presión en el casing = 2.28 (psi)

✓ Pérdida por fricción en el casing = 0.157 bar

Pérdida por fricción en el casing = Pérdida de presión en el casing (psi) / 14.5

Pérdida por fricción en el casing = 0.157 bar

Sustituyendo en:

$$P_H = P_{e1} + S_p + P_i - P_{e2} + h_{fc} + h_{fa}$$

$$P_H = 35 + 0 + 4.79 - 39.7 + 0.276 + 0.157 \text{ bar}$$

$$P_H = 0.52 \text{ bar}$$



Con los cálculos realizados se concluye que al pozo se le pueden inyectar más de 500 t/hr sin problemas. El riesgo sería que a caudales mayores de 500 t/hr, la velocidad sea tan alta que erosione la formación en el hueco abierto y se colapse el pozo. Por esto, si en un futuro se quisiera inyectar más de 500 t/hr, se tendría que instalar un liner ó tubería ranurada de 7 pulgadas para eliminar el riesgo de socavar el pozo. Si se hacen cálculos de la nueva presión de cabezal con un liner de 7 pulgadas (solo cambia el diámetro del agujero por 7 pulgadas), se darán cuenta que el aumento de presión de cabezal (debido al aumento de las pérdidas de presión al poner un liner de 7 pulgadas en vez del hueco abierto) sería aproximadamente de 0.5 bar.

Decidimos seleccionar como caudal nuevo a inyectar 500 ton/hr, tomando las 160 ton/hr que se inyectan al pozo RMT-1, además se tomarán la restante cantidad de salmuera de los pozos RMT-15, RMT-2 por su cercanía al reservorio y baja permeabilidad que estos poseen.



4. DISEÑO DE RED DE TUBERÍA.

4.1 Establecimiento de los parámetros de diseño.

Datos de la red de tubería

Distancia de la tubería: 1115.38 mts

Elevación del sistema de bombeo al pozo reinyector RMT-1: 70 mts

Para diseñar una red de tubería que conduce salmuera del sistema de bombeo a un pozo de reinyección, primero se debe conocer la topografía del terreno, un levantamiento topográfico, planimétrico y altímetro para determinar las elevaciones del terreno, diferencia de nivel o elevación de la bomba al pozo, se procede a realizar estudios preliminares ya sea corte o relleno según sea necesario. Una vez terminados estos estudios viene el trabajo de gabinete (dibujo y diseño de la rasante que se va a diseñar en el terreno para conocer la pendiente o % de la rasante).

Se hicieron las respectivas mediciones, determinando así la longitud de tubería con un total de 1,115.38 mts.

Los estudios topográficos (curvas de nivel, elevaciones), fueron facilitados por el departamento de obras civiles del campo geotérmico Momotombo, no incluidos en anexos por normas internas de la planta.



4.2 Cálculo del diámetro de tubería

Con la longitud de tubería y el caudal ya calculado de 500 ton/hrs de salmuera, se calcula el diámetro adecuado de la red de tubería que transportará este fluido; fijando una velocidad constante de 2 m/s por recomendación para evitar turbulencias y mantener el flujo laminar.

Se utiliza la siguiente fórmula:

$$D = \sqrt{4 \text{ m}^{\circ} / \rho v \pi}$$

m° = flujo másico

$$\text{m}^{\circ} = Q * \rho$$

Donde Q= caudal de inyección en ft^3/s y ρ =densidad de salmuera a temperatura de inyección (110°C) en lbm/ft^3

$$Q = 5.15 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\rho = 59.37 \text{ lbm}/\text{ft}^3$$

Sustituyendo tenemos,

$$\text{m}^{\circ} = 5.15 \text{ ft}^3/\text{s} * 59.37 \text{ lbm}/\text{ft}^3$$

$$\text{m}^{\circ} = 305.7555 \text{ lbm}/\text{s}$$

Entonces al sustituir en la fórmula de D. Obtenemos el siguiente resultado:

Con $V = 2 \text{ m/s}$, 6.56 ft/s

$$D = \sqrt{(4 * 305.7555 \text{ lbm}/\text{s}) / (59.37 \text{ lbm}/\text{ft}^3 * 6.56 \text{ ft/s} * \pi)}$$

Diámetro calculado $D = 1 \text{ ft}$, 12in

4.3 Selección del material de tubería, cédula y tipo de aislante térmico.

A continuación seleccionamos el material para la tubería, el material que se utiliza en la planta ORMAT- Momotombo es Acero al carbono ASTM A53 Grado B, tipo sin costura uniones soldables. Verificamos que es el material adecuado para el trabajo a realizar debido a sus propiedades que se detallan en el siguiente párrafo.

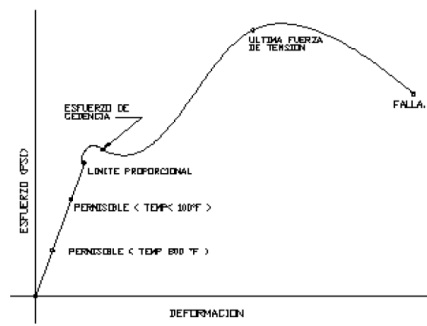
Características y propiedades del ASTM A53 Grado B.

Tubo para la conducción de fluidos y gases, de uso frecuente en petroquímica, pesca, minería e industria en general.

Curva esfuerzo-deformación para materiales dúctiles y no dúctiles.

Para un material dúctil tal como el ASTM A53 grado B, la curva esfuerzo-flexión está dada en la figura 1.1. La variación de esfuerzos en el material con respecto a la deformación sigue una línea recta hasta que el límite proporcional se alcanza. La ley de Hook define la pendiente como un módulo de elasticidad de Young E . El último esfuerzo tensil es la más alta fuerza.

La curva en la cual algún tirón adicional causará deformaciones permanentes a los elementos bajo esfuerzo; el esfuerzo permisible es el esfuerzo de cedencia dividido entre el factor de seguridad.



Grafica 10: Elasticidad del acero al carbono ASTM A53 grado B.



C	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08

Tabla 12: Composición química de la tubería ASTM A53 grado B

Utilizamos cédula 40 ya que su peso es menor y es el tipo de cédula que posee toda la red de tubería del campo geotérmico Momotombo.

Peso de la tubería ASTM A53 grado B

$$w = 53.5 \text{ lb/ft}$$

REF. Tubos de acero con y sin costura ASTM A-53 Grado B Tubisa.sac.

Temperatura (°C, °F)	Expansión térmica total in/ft	Expansión térmica lineal in/ft
110°C 230°F	1.248	1.17

Tabla 13: Temperatura de trabajo 110°C-230°F

Densidad (lb/in^3)	Razón de Poisson
0.283	0.288

Tabla 14: Densidad y razón de poisson.

Tipo de Aislamiento

El tipo de aislamiento recomendado para este tipo de tubería es el silicato de calcio, mismo que reviste todas las tuberías del campo geotérmico debido a su baja conductividad térmica.

Los componentes de una instalación (equipos, aparatos, conducciones y accesorios) deberían disponer de un sistema de aislamiento térmico con el siguiente espesor mínimo:

ESPESOR MÍNIMO DE TUBERÍAS Y ACCESORIOS CON FLUIDO INTERIOR CALIENTE				
Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm) según temperatura del fluido			
	40-65 °C	65-100 °C	100-150 °C	150-200 °C
$D \leq 35$	20	20	30	40
$35 < D \leq 60$	20	30	40	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40	50
$90 < D \leq 140$	30	40	50	50
$140 < D$	30	40	50	60

Tabla 15: Espesor mínimo de tuberías con fluidos a altas temperaturas.

**Comentarios:**

- El diámetro exterior se refiere a la tubería sin aislar.
- Para fluidos calientes se escoge la temperatura máxima en la red y para fluidos fríos la temperatura mínima.
- Los espesores están referidos a componentes de instalados en interiores. Cuando están instalados en exteriores, los espesores indicados en las tablas anteriores se incrementarán, como mínimo, en 10 mm para fluidos calientes y en 20 mm para fluidos fríos.
- Los espesores indicados son válidos cuando los componentes contengan fluidos a temperatura inferior a la del ambiente; o superior a 40 °C cuando están situados en locales donde no hay calefacción, entre los que se deben considerar los platinillos, galerías, salas de máquinas y similares.
- Los componentes que vengan aislados de fábrica tendrán el nivel de aislamiento marcado por la respectiva normativa o determinado por el fabricante.
- Los espesores son válidos para materiales con conductividad térmica de referencia " $\lambda_{\text{ref}} = 0,040 \text{ W/(m}^\circ\text{K)}$ " a 20 °C.



superficie	Laminar $10^4 < Gr_f Pr_f < 10^9$	Turbulencia, $Gr_f Pr_f > 10^9$
Plano cilindro vertical	$h = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}}$	$h = 1.31 (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$
Cilindro horizontal	$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{\frac{1}{4}}$	$h = 1.24 (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$

Tabla 16: Ecuaciones simplificadas para la convección natural desde varias superficies hacia el aire a presión atmosférica. (Referencia slide share: convección natural).

Donde h = coeficiente de transferencia de calor, $W/m^2\text{°C}$, $Btu/hr\text{ ft}^2\text{°F}$.

$$\Delta T = T_i - T_{amb}$$

L = longitud vertical u horizontal.

D = diámetro exterior (m).

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$

$$h = 1.32 \left(\frac{110 - 35}{0.3238} \right)^{1/4}$$

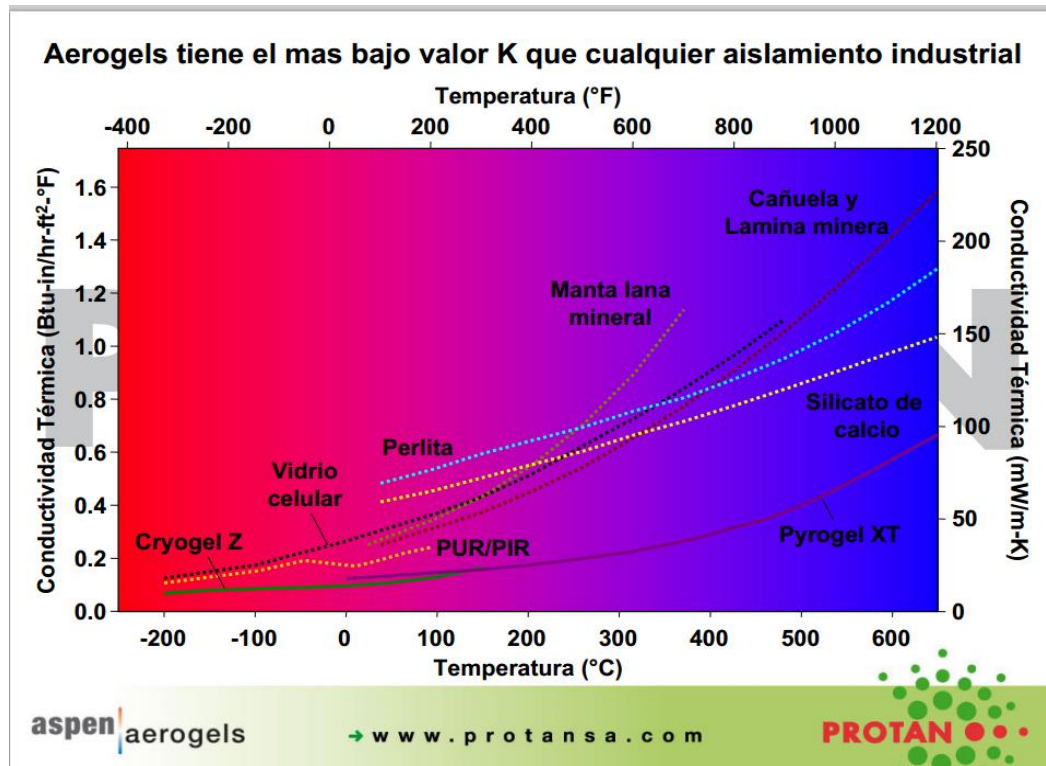
$$h = 1.32 \left(\frac{75}{0.3238} \right)^{1/4} = 76.43\text{ w}/m^2\text{°C}$$

$$1\text{ watt} = 3.412\text{ Btu}/hr$$

$$h = \frac{76.43\text{ W}}{m^2\text{°C}} * \frac{3.412\frac{\text{Btu}}{hr}}{w} * \frac{1\text{°C}}{33.8\text{°F}} * \frac{1m^2}{10.7584\text{ Ft}^2}$$

$$h = 0.72\text{ Btu}/hr\text{ Ft}^2$$

Conductividad térmica



Gráfica 11: conductividad térmica.

$K = \text{conductividad térmica} \approx 0.033 \text{ Btu} / \text{hr ft}^2 \text{°F}$ (extraído de la figura anterior).

$$r_{\text{Crítico}} = \frac{k}{h}$$

Donde

$$K = \approx 0.033 \text{ Btu} / \text{hr ft}^2 \text{°F}$$

$$h = 0.72 \text{ Btu} / \text{hr ft}^2 \text{°F}$$



Sustituyendo,

$$rc = \frac{0.033 \text{ Btu/hr Ft}^\circ\text{F}}{0.77 \text{ Btu/hr Ft}^2^\circ\text{F}} = 0.0428 \text{ Ft}$$

$$rc = 1.3 \text{ cm}$$

r_e = radio exterior de la tubería

$$r_e = 1.01 \text{ ft.}$$

Cálculo de calor en tubería (sin aislante).

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi r_i h_i} + \frac{\ln(\frac{r_e}{r_i})}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r_e h}}$$

ΔT = Temperatura interna de la tubería – Temperatura ambiente (230°F – 95°F)

r_i = Radio interior de la tubería. (1ft)

r_e = Radio exterior de la tubería. (1.01ft)

k = conductividad térmica de la tubería. (0.47 Btu / hr ft°F, tomada de anexo

5. Propiedades térmicas de algunas aleaciones)

h_i = Coeficiente de transferencia de calor interior de la tubería por convección.

h = Coeficiente de transferencia de calor exterior de la tubería por convección.



El valor de h_i se calcula con la siguiente fórmula:

$$h_i = Nu \cdot k / D$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3}$$

$$Re = (V \cdot D) / \nu$$

V = velocidad media del fluido 2m/s, 6.56 ft/s

ν = viscosidad cinemática del fluido (1.946×10^{-6} ft²/s)

D = diámetro 1 ft

$$Re = (6.56 \text{ ft/s} \cdot 1 \text{ ft}) / 1.946 \times 10^{-6} \text{ ft}^2/\text{s}$$

$$Re = 3.38 \times 10^6$$

Numero de Prandtl para liquido saturado = 1.043

$$Nu = 0.023 (3.38 \times 10^6)^{0.8} (1.043)^{0.3}$$

$$Nu = 3893.55$$

Sustituyendo en:

$$h_i = Nu \cdot k / D$$

$$h_i = (3893.55 \cdot 281.408 \times 10^{-3} \text{ Btu/hr.ft.F}^0) / 1 \text{ ft}$$

$$h_i = 1095.67 \text{ Btu/hr.ft}^2 \cdot \text{F}^0$$



Sustituyendo,

$$Q = \frac{230 - 95 \text{ }^{\circ}\text{F}}{\frac{1}{2\pi * 0.5 * 1095.67 \text{ Btu/hr.ft}^2.\text{ }^{\circ}\text{F}} + \frac{\ln(0.505/0.5)}{2\pi * 0.47 \text{ Btu / hr ft}^{\circ}\text{F}} + \frac{1}{2\pi * 0.505 \text{ ft} * 0.72 \text{ Btu/hr.ft}^2.\text{ }^{\circ}\text{F}}}$$

$$Q = \frac{135}{0.44}$$

$$Q = 306.82 \text{ Btu / hr ft}$$

Cálculo de calor con aislante, iterando valores entre 2 in y 3 in de espesor de aislante (por ser el rango de espesor de aislante que se utiliza en la planta geotérmica)

$$Qa = \frac{\Delta T}{\frac{\ln(\frac{De}{Di})}{2\pi k} + \frac{1}{\pi De h}}$$

Donde:

k : Conductividad del aislante, (0.033 Btu / hr ft[°]F)

$De = 12.750 \text{ in} + 2 \text{ in}$

$De = 14.75 \text{ in}$ ó 1.23 ft

$Di = 12 \text{ in}$ ó 1 ft

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$



$$h = 1.32 \left(\frac{110 - 35}{0.3749} \right)^{1/4}$$

$$h = 1.32 \left(\frac{75}{0.3749} \right)^{1/4} = 66 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

$$h = 0.62 \text{ Btu/hrFt}^2$$

Sustituyendo en fórmula de calor con aislante;

$$Qa = \frac{230 - 95 \text{ °F}}{\frac{\ln(1.23/1.01)}{2\pi * 0.033 \text{ Btu / hr ft}^2\text{°F}} + \frac{1}{\pi * 1.23 \text{ ft} * 0.62 \text{ Btu/hr.ft}^2\text{°F}}}$$

$$Qa = \frac{135}{1.3678}$$

$$Qa = 98.70 \text{ Btu / hr ft}$$

Porcentaje de reducción de calor con aislante,

$$\% = \frac{Q - Qa}{Q} * 100\%$$

$$\% = \frac{306.82 - 98.70}{306.82} * 100\%$$

$$\% = 67.83$$



Con espesor de aislante de 3 in:

k : Conductividad del aislante, (0.033 Btu / hr ft°F)

$$De = 12.750 \text{ in} + 3 \text{ in}$$

$$De = 15.25 \text{ in} \text{ ó } 1.2725 \text{ ft}$$

$$Di = 12 \text{ in} \text{ ó } 1 \text{ ft}$$

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{1/4}$$

$$h = 1.32 \left(\frac{110 - 35}{0.3878} \right)^{1/4}$$

$$h = 1.32 \left(\frac{75}{0.3878} \right)^{1/4} = 63.8 \text{ w/m}^2\text{°C}$$

$$h = 0.59 \text{ Btu/hrFt}^2$$

Sustituyendo en fórmula de calor con aislante;

$$Qa = \frac{230 - 95 \text{ °F}}{\frac{\ln(1.2725/1.01)}{2\pi * 0.033 \text{ Btu / hr ft}^2\text{°F}} + \frac{1}{\pi * 1.2725 \text{ ft} * 0.59 \text{ Btu/hr.ft}^2\text{°F}}}$$

$$Qa = \frac{135}{1.5381}$$

$$Qa = 87.77 \text{ Btu / hr ft}$$



Porcentaje de reducción de calor con aislante,

$$\% = \frac{Q - Q_a}{Q} * 100\%$$

$$\% = \frac{306.82 - 87.77}{306.82} * 100\%$$

$$\% = 71.39$$

Nota: Seleccionamos espesor de 3 in de espesor ya que el porcentaje de reducción de pérdidas de calor es mayor.

4.4 Selección de los accesorios.

- **Número de soportes utilizados en la red de tubería.**

- ✓ 63 soportes verticales
- ✓ 48 guías
- ✓ 19 anclajes
- ✓ 4 Linestop
- ✓ 4 Loops

En total se utilizarán 152 soportes cumpliendo con el espaciado recomendado entre 7 y 8 mts entre soportes para tuberías con diámetros de 12 in.

- **Número de codos utilizados en la red de tubería.**

- ✓ 7 codos de 90°
- ✓ 13 codos desde 110° hasta 164°



4.5 Comprobación de la resistencia del arreglo por esfuerzos térmicos.

Análisis de esfuerzo de Tubería

El análisis de esfuerzo de tubería provee la técnica necesaria para que los ingenieros diseñen sistemas de tubería sin sobre esforzar o sobrecargar los componentes de tubería y equipo conectado. Los términos siguientes de mecánica aplicada están aquí brevemente discutidos (no definidos) para familiarizar al ingeniero con ellos.

Para ubicar los soportes, primero hay que calcular la flexibilidad de la tubería según código ANSI.B31.1. Al independiente analizar una tubería sometida a temperatura deberá analizarse el esfuerzo térmico (fenómeno de expansión y dilatación) de manera independiente a los esfuerzos por flexión o torsión causados por el peso de la tubería y accesorios.

Cargas estáticas y dinámicas.

Las cargas afectando el sistema de tubería pueden ser clasificadas como primarias y secundarias. La carga primaria ocurre de cargas sostenidas como el peso muerto. Las cargas primarias son llamadas cargas no auto limitante. Un ejemplo de carga secundaria (auto limitante) es la carga de expansión térmica. A causa de que códigos de tubería diferentes, definen el criterio de calificación de tubería en caminos ligeramente diferentes.

Las cargas estáticas incluyen:

1. Efecto peso (cargas vivas y cargas muertas)
2. Efectos de expansión y contracción térmica.
3. Efectos de soporte, anclaje y movimientos terminales.
4. Cargas de presión interna y externa.



Las cargas vivas bajo el efecto del peso incluyen peso del contenido, nieve, y cargas de hielo. Las cargas muertas consisten de pesos de válvulas de tubería, bridas, aislamiento, y otras cargas permanentes sobrepuestas.

Las cargas dinámicas incluyen:

1. Fuerzas de impacto.
2. Viento.
3. Cargas sísmicas (terremotos)
4. Vibración.
5. Cargas de descarga.

El esfuerzo térmico permisible está dado por la siguiente fórmula:

$$S_A \leq 1.25S_C + 0.25S_h$$

Donde;

S_A : esfuerzo térmico permisible.

S_C : esfuerzo permisible a temperatura ambiente.

S_h : esfuerzo permisible a temperatura de operación (110°C, 230°F).

$$S_C = S_h = 15000psi$$

$$S_A = 1.25(15000) + 0.25(15000) = 22500psi$$



4.6 Cálculos necesarios para dimensionamiento y ubicación de los distintos tipos de soportes.

Cálculo de Loops.

Δ = coeficiente de expansión a ser adsorbida por el Loop (1.24 in/100ft) Tabla A1.1

D = diámetro nominal en pulgadas (12")

L_l = longitud total a distribuir los loops (2324.8 ft.)

L_d = distancia para la cual se necesita un loop (290.6 ft.)

L_T = longitud total de la tubería

L = distancia entre guías (ft)

L_1 = distancia entre anclajes (ft)

L_2 = longitud de curva requerida para absorber la expansión (ft)

S_A = esfuerzo térmico permisible

S_c = esfuerzo permisible a temperatura ambiente

S_h = esfuerzo permisible a la temperatura de operación

OD = diámetro exterior de la tubería (12.750 in)

S_b = esfuerzo de flexión

$$L_d = L_l / 8$$

La determinación de secciones para la distribución de los Loops está a criterio del diseñador y en este caso 1.24 in/100ft.



Cálculo de la expansión para $290.6\text{ft} \cdot \Delta$

$$290.6\text{ft} \cdot 1.24 \text{ in}/100\text{ft} = 3.6\text{in}$$

Cálculo de la expansión total de la tubería

$$3658.1\text{ft} \cdot 1.24 \text{ in}/100\text{ft} = 45.3\text{in}$$

Referencia. Según el monograma para determinar el tamaño de la espira (Loops) figura 5.12 pág.79 Introducción al análisis de esfuerzos en tuberías.

$$(12'' \text{ Y } 3.6 \text{ in}) \quad L_2 = 42 \text{ ft}$$

$$L_2 = 2H + W = 42\text{ft}$$

$$H = W = 14\text{ft}$$

Cálculo de la distancia entre las guías

$$L = \sqrt{\frac{(3EDA)}{144S_A}}$$

$$L = \sqrt{\frac{3(28.65E^6)(12\text{in})(3.6\text{in})}{(144)(22500\text{psi})}}$$

$$L = 33.8 \cong 34 \text{ ft}$$

Cálculo de esfuerzos y cargas usando el método de Kellog.

Constantes;

$$K_1 = \frac{W}{L} = \frac{\text{ancho}}{\text{distancia entre guías}} = \frac{14}{33.8} = 0.4\text{ft}$$

$$K_2 = \frac{H}{L} = \frac{\text{altura}}{\text{distancia entre guías}} = \frac{14}{33.8} = 0.4\text{ft}$$

Para $K_1 = 0.4$ y $K_2 = 0.4$, de la figura 5.10, leer $\frac{L_2 S_A}{10^7 D \Delta}$



$$L_2 = \frac{1}{2}(L)(1 - K_1)$$

$$L_2 = \frac{1}{2}(34)(1 - 0.04) = 16.22ft$$

Deflexión = L_d * coeficiente de expansión de acero al carbón a 230°F (apéndice A1.1)

$$\text{Deflexión} = 290.6ft * \frac{1.24in}{100ft} = 3.6in$$

$$OD = 12.750in$$

$$S_b = \frac{\frac{L_2 S_A}{10^7 D \Delta} * OD * \Delta}{L^2} = \frac{0.04E^7 * 12.750in * 3.6in}{(34ft)^2} = 15882psi$$

Entonces como $S_b < S_A$, la tubería está bien soportada.

Momentos y fuerzas

Utilizando la figura 5.11 (ver anexo)

$$K_1 = 0.4K_2 = 0.4$$

$$A_1 = 0.35A_2 = 0.58$$

Momento de inercia para diámetro exterior de la tubería tabla A4.4 (ver anexo)

$$I = 300in^4$$

$$F_{xA'} = -F_{xB'} = -10^6 A_1 \left(\frac{I * \Delta}{L^3} \right) EC. 1$$

$$M_{zA} = -M_{zB} = -10^5 A_2 \left(\frac{I * \Delta}{L^2} \right) EC. 2$$



$$\frac{I * \Delta}{L^3} = \frac{300 * 3.6}{34^3} = 0.027$$

$$\frac{I * \Delta}{L^2} = \frac{300 * 3.6}{34^2} = 0.93$$

Sustituyendo en la ecuación 1

$$F_{xA'} = 0.027 * 10^6 * 0.35 * 0.027 = 9450lb$$

Sustituyendo en la ecuación 2

$$M_{zA} = 0.058 * 10^5 * 0.93 = 539400lb$$

Espaciado Sugerido entre Soportes

Ø Exterior	Pulg	1	1 ½	2	2 ½	3	3 ½	4
	Mm	25,4	38,1	50,8	63,5	76,5	88,9	101,6
Espacio	Pies	7	9	10	11	12	13	14
	Mts.	2,134	2,743	3,048	3,353	3,658	3,962	4,267
Ø Exterior	Pulg.	5	6	8	10	12	14	16
	Mm	127	152,4	203,2	254	304,8	355,6	406,4
Espacio	Pies	16	17	19	22	23	25	27
	Mts.	4,877	5,182	5,791	6,706	7,01	7,62	8,23

Tabla 17: Espacios entre soportes.



4.7 Ubicación de los Loops, soportes móviles y puntos fijos.

Para la ubicación y espaciamiento entre soportes de apoyo y la selección de soporte fijo se toma en consideración lo siguiente:

1. Peso de la tubería.
2. Deflexión para tubería de acero al carbón.
3. Distancia recomendada para trazos rectos y curvas.
4. Condiciones topográficas en base a configuraciones existentes en el campo.
5. Relación de longitud entre punto fijo y tubería desarrollada entre estos puntos. Mayor de 1.

La ubicación apropiada de soportes colgantes o soportes fijos involucra consideraciones de la propia tubería, de la estructura a la cual se transmite la carga y de las limitaciones de espacio. Los puntos preferidos de fijación de la tubería son:

- a. Sobre tubería propiamente y no sobre componentes tales como: válvulas, accesorios o juntas de expansión. Bajo cargas concentradas (puntuales), las bridas y juntas roscadas pueden gotear y los cuerpos de válvulas pueden deformarse produciendo goteo, trabazón del vástago o goteo a través del asiento.
- b. Sobre tramos rectos de tuberías en lugar de sobre codos de radios agudos, juntas angulares o conexiones de ramales prefabricados, puesto que en estos sitios se encuentra la tubería ya sometida a esfuerzos altamente localizados, a los cuales se agregarían los efectos locales de la fijación.
- c. Sobre tramos de tuberías que no requieran remoción frecuente para limpieza o mantenimiento.
- d. Tan cerca como sea posible de concentraciones grandes de carga, tales como: tramos verticales, ramales de tubería, válvulas motorizadas o bien válvulas pesadas y recipientes menores, tales como separadores.



5. SELECCIÓN DE LA BOMBA.

5.1 Fórmula de Hazen Williams.

La fórmula de Hazen Williams es una de las más populares para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. Su uso se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores de 2 pulgadas y menores de 6 pies la velocidad de flujo no debe exceder los 10 pies/s.

Esta fórmula es específica en cuanto a unidades. En el sistema de unidades tradicional de estados unidos adopta la forma siguiente:

$$hf = \frac{1,743.811 * L * Q^{1.85}}{C^{1.85} * D^{4.87}}$$

C = Coeficiente de HAZEN para acero = 100

El coeficiente C_h solo depende de la superficie de la tubería o conducto.

$$Q = 525.8 \text{ m}^3/\text{hr} = 146 \text{ lts/seg.}$$

Para conocer la longitud lineal de las secciones curvas de la red de tubería se toman las siguientes consideraciones:

$$6 \text{ codos de } 90^\circ \text{ de } 12" = 6 * 7.9 = 47.4 \text{ mts}$$



$$\propto \text{Angulo } 164^\circ C = \frac{5\pi}{14} r \quad r = 152 \text{ cm}$$

$$L = \frac{5\pi}{14} (152) = 170.5 \text{ cm}$$

$$\propto = 108 \quad r = 152 \text{ cm}$$

$$L = \frac{20\pi}{29} (152 \text{ cm}) = 3.29 \text{ m}$$

$$\propto = 133$$

$$L = \frac{20\pi}{27} (152 \text{ cm}) = 116 \text{ cm} = 3.53 \text{ m}$$

$$\propto = 152 \text{ cm}$$

$$L = \frac{20\pi}{59} = 404.6 \text{ cm} = 4 \text{ mts}$$

$$\propto = 130 \text{ cm}$$

$$L = \frac{50\pi}{7} (152) = 341.6 \text{ cm} = 3.41 \text{ mts}$$

$$\propto = 147^\circ$$



$$L = \frac{20\pi}{49}(152cm) = 195\text{ cm} = 1.95\text{ mts}$$

$$\alpha = 142$$

$$L = \frac{50\pi}{63}(152cm) = 379\text{ cm} = 3.8\text{ mts}$$

$$\alpha = 151$$

$$L = \frac{5\pi}{6}(152cm) = 398\text{ cm} = 4\text{ mts}$$

$$\alpha = 100$$

$$L = \frac{5\pi}{9}(152cm) = 265\text{ cm} = 2.65\text{ mts}$$

$$\alpha = 113$$

$$L = \frac{5\pi}{8}(152cm) = 298\text{ cm} = 3\text{ mts}$$

$$\alpha = 135$$

$$L = \frac{10\pi}{13}(152cm) = 367\text{ cm} = 3.67\text{ mts}$$

$$12\text{ codos de distintos grados} = \frac{34.86\text{ mts}}{82.26\text{ mts}}$$



$$L = 1,115.38 \text{ m} + 82.26 \text{ mts} = 1,197 \text{ mts} \approx 1,200 \text{ mts}$$

$$hf = \frac{1,743.811 * 1,200 * (146 \text{ lts/seg})^{1.85}}{100^{1.85} * 12^{4.87}}$$

$$hf = \frac{2,102,667}{902,843,900.3} = 23.4 \text{ mts}$$

$$H_B = \text{Altura diferencia de niveles} + \text{altura (hf)}$$

$$H_B = 70 \text{ mts} + 23.4 \text{ mts} = 93.4 \text{ mts}$$

$$NU = Q * \gamma * HB$$

$$NU = 0.146 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} * \left(951 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 93.4 \text{ m}$$

$$NU = 127,136.8801 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx \text{watt} * \frac{\text{hp}}{745.7 \text{ w}} = 170 \text{ hp}$$



5.2 Cálculo del NPSH requerido y NPSH disponible

NPSH requerido:

Término para cuantificar la presión necesaria en la succión de la bomba que garantice un funcionamiento adecuado.

$$NPSH_{requerido} = H_B + \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

H_B = altura de carga total

v = velocidad del fluido

$$NPSH_{requerido} = 93.4 \text{ m} + \frac{(2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.8 \text{ m/s}^2}$$

$$NPSH_{requerido} = 93.6 \text{ m}$$

NPSH disponible:

Un buen diseño permite un valor alto de NPSHA

Los factores que afectan el NPSH disponible son:

- La presión actuando sobre la superficie del líquido
- La carga estática “columna de agua”
- Las pérdidas por fricción en la tubería de succión
- La velocidad del líquido en la succión
- La presión de vapor del líquido



- Estos factores constituyen las condiciones dinámicas de succión y necesitan ser cuidadosamente consideradas antes de hacer la selección final de la bomba

NPSH (disponible) Tiene que ser mucho mayor que el NPSHR (requerido) por la bomba para prevenir:

- Mal comportamiento de la bomba
- Vibración excesiva
- Operación ruidosa
- Fallo prematuro de los componentes

$$NPSH_{disponibles} = P + L_H - (V_P + h_F)$$

Donde:

P = presión del líquido desde un depósito cerrado en pies absolutos

L_H = altura de succión mínima estática en pies

V_P = presión de saturación del líquido.

h_F = pérdidas por fricción en pies en la succión de la tubería.

$$P = 13420.5 \text{ lb /ft}^2$$

$$L_H = 0$$

$$V_P = 12065 \text{ lbf/ft}^2$$

$$h_F = 0.98 \text{ ft este fue asumido}$$

$$NPSH_{disponibles} \geq NPSH_{requerido} \text{ Para que no Cavite la bomba.}$$

$$1354.02 \text{ } NPSH_{disponibles} \geq 93.60 \text{ } NPSH_{requerido}$$



6. COSTO DE EQUIPOS Y ACCESORIOS DE SISTEMA DE BOMBEO.

6.1 Estructura de costos de Proyecto.

Nombre de Equipo o Accesorio	Cantidad	Precio \$
Tubería Acero al carbón A 53 grado B.	174 tubos	\$92,859.28
Aislante Térmico Silicato de Calcio.	20 m ³	\$2800
Bomba centrífuga de inyección.	2 bombas	\$50,000
Motor eléctrico.	2 motores	\$100,000
Válvula Check.	1 válvula	\$724
TOTAL		\$246,383.28

7. ANÁLISIS DE BENEFICIO AMBIENTAL.

Análisis de salmuera

Componentes	ppm
Sodio	1860
Potasio	450
Calcio	41.4
Magnesio	0.9
Zinc	0.005
Hierro	1.5
Sílice	680
Cadmio	0.0005
Cobre	0.0088
Plomo	0.0020
Níquel	0.0023
Cloruro	3200
Sulfatos	90
Carbonatos	3
Bicarbonatos	83
Nitratos	4.5

Tabla 18: Componentes químicos de la salmuera

Otras propiedades de la salmuera son:

Conductividad: 10500 MMhos/cm²

PH: 8.15

Hoy en día todo proyecto que sea ejecutado debe en su mayoría ser amigable con nuestro medio ambiente y evitar sobre todo la contaminación, deterioro y explotación de manera indiscriminada de los recursos naturales que aun gozamos, a pesar de la falta de conciencia y compromiso de los seres humanos a preservar la naturaleza y sus riquezas.



Es por eso que día a día las grandes empresas tratan de cumplir cabalidad las normas y leyes locales, nacionales e internacionales de preservación del medio ambiente. Además de cumplir con la responsabilidad social y ambiental que estas asumen, le da un valor agregado a su producto o servicio.

Desde que la compañía ORMAT asumió la concesión de la planta geotérmica de Momotombo revitalizó satisfactoriamente el sistema de reinyección del campo geotérmico, que se encontraba fuera de funcionamiento anteriormente y que por dicha causa se contaminó en porcentajes considerables el lago Xolotlán por los altos contenidos de los componentes químicos que conforman la salmuera (detallados en tabla 18).ORMAT logró alcanzar el 100 % de reinyección dando un trato adecuado a los recursos geotérmicos.

A pesar de este gran esfuerzo algunos de los pozos reinyectores han perdido paulatinamente su capacidad de absorción y en un futuro esto puede ocasionar graves daños ambientales.

Con la ejecución de este proyecto no sólo se logrará mantener la recarga hídrica del reservorio, sino que se evitará por completo, que nuevamente se libere salmuera al lago y acabe con el ecosistema acuático del mismo. Por esta razón, nuestro trabajo monográfico es totalmente beneficioso para el medio ambiente.

Esta es la importancia de que las empresas, negocios y sobre todo la generación de energía sea cada vez más limpia.



8. CONCLUSIONES

1. Después de realizada la prueba de inyección en el pozo RMT-1; se procesaron los datos obtenidos, para el debido análisis con el software Well Tester; obteniendo como resultado que el caudal idóneo de inyección para el pozo RMT-1 es de 500 Ton/hr.
2. Se seleccionó la trayectoria adecuada, representada en planos para la red de tubería con la ayuda del departamento de obras civiles; es importante mencionar que esta trayectoria economiza costos de ejecución del proyecto con una longitud total de tubería de 1200 mts.
3. Se seleccionó el tipo de material de la tubería acero al carbono ASTM A53 grado B, diámetro de 12 in, aislante térmico silicato de calcio con un espesor de 3 in; necesarios para el trabajo requerido. Además se realizaron los cálculos pertinentes para la ubicación de los soportes y anclajes, los cuales permiten que la tubería resista a los efectos de peso y dilatación térmica por las altas temperaturas del fluido circulante.
4. Por el alto contenido de salinidad de la salmuera y las altas concentraciones de elementos químicos perjudiciales para los ecosistemas acuáticos del lago Xolotlán, basados en los análisis realizados por el departamento químico de la planta geotérmica; la salmuera debe ser totalmente reinyectada y evitar el drenaje al lago. Razón importante para la ejecución de nuestro proyecto que garantiza mantener el 100 % de reinyección para los próximos años.
5. Los costos del proyecto se establecieron garantizando la utilización de equipos y accesorios de calidad con un monto total de \$ 246,383.28.



9. BIBLIOGRAFÍA

- Roland N. Horne "Modern Well Test Analysis A computer- Aided Approach" Second Edition.,, COPYRIGHT 1995, by Petroway, inc. 926 Bautista Court Palo Alto, CA94303(650)494-2037.
- WellTester software, Islandia GeoSurvey (ISOR) 2006.
- Mataix Claudio, 1975; "TURBOMAQUIAS HIDRAULICAS", 2d ed., John Wiley and Sons, Inc. , New York.
- Karlekar BV, desmond RP. 1985. Transferencia de calor. Mexico City: Editorial Interamericana. Lan YH, Novakofski J, McCusker RH, Brewer MS, Carr TR, McKeith FK. 1995 Thermal gelation of pork, beef.Fish chicken and turkey muscles as affected by heatig rate and pH. Food Sci 60(5):936-40,945.
- Cengel, Y.A. Introduction to thermodynamics and heat transfer Boston : Irvin McGraw-Hill, 1997
- Cengel, Y. A transferencia de calor y masa. , 4 edición, Publisher McGraw-Hill Interamericana de España S.L...2011 ISBN 6071505402, 9786071505408: length 944 pages.
- Yunus A. Cengel, John M. Cimbala series in engineering termal-fluid sciences, 2 edicion, publisher McGraw- Hill, 2010 ISBN 0070700346, 9780070700345 Length 994pages fluid dynamics.
- MALISHEV A., NIKOLAEV G., SHUVALOV Y. Tecnología de los metales.



- Moot, Robert L. Mecánica de fluidos aplicada, México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996.
- Crane. Flujo de Fluidos en válvulas, Accesorios y tuberías.
- Introducción al análisis de esfuerzo de Tuberías, pág. 79.
Traducción de: “Introduction **to pipe stress analysis** “
Sam Kannappan, P.E. Ingeniero. Tennessee Valley Authority. Knoxville, Tennessee. Realizado por: Benjamin Serratos (Agosto 2008)
- Julio Cesar Campos Paiz, Sistema de bombeo de reinyección de agua de condensado de vapor de planta geotérmica a Calderas.pdf.
- Enrique Alberto Porras Mendieta. Análisis de los datos de producción del Campo geotérmico Momotombo, Monografía UNI.
- Jean Karl Aburto. Bernardo Antonio Izaguirre Pereira, Diseño de la conexión del pozo MT-41 al sistema principal de recolección de vapor y rediseño del sistema de sistema de reinyección del campo geotérmico Momotombo.

Sitios Web

- <http://www.ormat.com>
- <http://www.tubisa.com.pe/catalogo.html>
- <http://Convección Natural – Slideshare.html>
- <http://www.ansi.org>.
- <http://spanish.alibaba.com/product-gs/price-calcium-silicate-933931563.html>

ANEXOS



PROFORMA Nº: 14310

Pali Israel Lewites 1C abajo, 1C al lado, Managua, Nicaragua PBX: 2279-1040 Fax: 2269-3043 Cel: 8882-6001 NIT: J031000000751 Correo: ventas@tubalsa.com.ni

Señor(es): RIO ESCONDIDO INDUSTRIAL S.A.

Fecha: 25 / 09 / 2013

Dirección:

Referencia: USO

Atención: ING. HIGO JIMENEZ

Vendedor: Reynaldo Pérez López

CANT.	U.M.	DESCRIPCION	PRECIO UNIT.	SUB TOTAL	DESC 10.0 %	TOTALES C\$
1.00	UND	VALVULA CHECK UNIV. ACERO CARBON 13%CR. CLASE 30012" 3-61-RF BONNEY FORGE	0,100.00	20,100.00	2,010.00	18,090.00
Número de Registros: 1			Elaborado por : Reynaldo Pérez López	SUMAS :	20,100.00	2,010.00
						18,090.00

NOTAS:

MATERIAL DISPONIBLE PARA ENTREGA INMEDIATA

Sub-Total : 18,090.00

15% IVA : 0.00

TOTAL : 18,090.00

OFERTA VALIDA POR TRES DIAS HABILES

EXISTENCIAS Y PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN AVISO PREVIO

LA FIRMA Y SELLO DE ESTE DOCUMENTO POR PARTE DEL CLIENTE, CONSTITUYE UNA ACEPTACION EXPLICITA Y COMO TAL SE TOMA COMO UNA ORDEN DE COMPRA

FAVOR ELABORAR CHEQUE A NOMBRE DE TUBAL, S.A.

SOMOS GRANDES CONTRIBUYENTES, ESTAMOS EXCENTOS DEL 1% DE RETENCION EN LA FUENTE

FIRMA Y SELLO DEL CLIENTE

MEDIANTE LA FIRMA DE ESTE DOCUMENTO, EL CLIENTE DA POR ACEPTADOS TODOS LOS TERMINOS DE ESTA COTIZACION: CANTIDADES, UNIDADES DE MEDIDA, DESCRIPCIONES, PRECIOS Y PLAZOS DE ENTREGA, AUTORIZANDO A TUBAL, S.A. EL DESPACHO Y FACTURACION DE LA MERCADERIA AQUI DESCRITA

Estamos excentos del 1% de retención en la fuente



Una Compañía de **AquaCorp**

- P -

Página 1 de 2

No. Cotización:

30394 Parte: A

Nicaragua, 25-09-2013

Señores: (402345) CUKRA DEVELOPMENT CORPORATION, S.A.

Atención a: ING. NORMAN LOPEZ/ING. HIGO JIMENEZ

Dirección: CEMENTERIO GRAL. 2C. ARRIBA, 25 VRS. SUR ZONA 1

Teléfono: 22681002

Fax: 2681018

Cotización: Bomba centrífuga cerrada, Goulds Model 3316 two stage, Horizontally split case Pumps. con caudal de $681 \text{ m}^3/\text{h}$ acoplada a motor de 175 Hp, 400v 30 amp

Cant. Artículo Rubro "A": Equipo y Artículos

2 1 163626 DC250110T (ST50ASC) BOMBA Goulds 175Hp

Subtotal Rubro "A"	\$	150,000.00
Descuento		1,050.00
Total Rubro "A"	\$	0.00
SUBTOTAL	\$	148,950.00
IGV	\$	762.75
TOTAL EN DOLARES	\$	149,712.75

Km. 2.5 Carretera Norte, Managua, Nicaragua • TEL: (505) 2249-6292 • FAX: (505) 2249-4694

www.aquacorp.com



DISTRIBUIDORA ROAG DE NICARAGUA S.A

PROFORMA: 9491

RUC # J0310000001391

SOMOS GRANDES CONTRIBUYENTES, EXENTOS DEL 1%

ELABORAR CK A NOMBRE DE DISTRIBUIDORA ROAG DE NICARAGUA, S.A

Fecha : 10 /10 /***	CREDITO 30	Vendedor : Randy Flores
Código : 000006	Cliente : Planta Geotermica Momotombo	
Teléfono: 22681002	Direccion : CEMENTERIO GRAL.2C ARRIBA 25 VRS AL SUR	

CONDICIONES DE LA OFERTA

Oferta Válida: 5 Días.

Transporte Gratis en cualquier lugar de Nicaragua.

Tipo de Cuenta: BANCENTRO BAC BANPRO
 Cordobas: 100235560 351223854 10013905715885
 Dolares: 101229505 351223847 10013915715891

No se aceptan devoluciones una vez cortado el material, se omiten errores en los cortes realizados por parte de DISTRIBUIDORA ROAG DE NICARAGUA, S.A.

Cantidad	Código	Descripción	Medidas	Precio Uni.	Total
174	003-007-0012	TUBO H.N. CED. 40 DE 12" C/BISEL GB	UND	16,120.00	2,018,680.00

MATERIAL PARA ENTREGAR EN 8 DIAS HABILES UNA VEZ CONFIRMADA LA ORDEN DE COMPRA	SUBTOTAL C\$	2,018,680.00
	DESCUENTO	0.00
	SUBTOTAL	2,018,680.00
	I.VENTAS	302,802.00
	TOTAL C\$*	2,321,482.00

10/10/2013 09:52

Direccion: Km 13.5 carretera a Masaya . Telefonos:. 2279-8309 /2279-1708/2279-9923.

www.acerosroag.com correo telemarketing@acerosroag.com

A-5a. Propiedades físicas del agua

Temperatura del agua <i>t</i> Grados centígrados	Presión de saturación <i>P'</i> Bar absolutos	Volumen específico <i>v x 10³</i> Decímetros cúbicos por kilogramo	Densidad <i>P</i> Kilogramos por metro cúbico
.01	.006112	1.0002	999.8
5	.008719	1.0001	999.9
10			
15	.017041	1.0010	997.9
20	.023368	1.0018	998.2
25			
30	.042438	1.0044	990.2
35	.073750	1.0079	982.2
40			
45	.09582	1.0099	990.2
50			
55	.15740	1.0131	980.2
60	.19919	1.0171	973.2
65	.25008	1.0199	980.5
70			
75	.31160	1.0230	977.8
80	.47359	1.0290	971.8
85			
90	.70165	1.0391	961.1
95			
100	1.84526	1.0491	951.0
110	1.4326	1.0515	943.1
120	1.9853	1.0603	934.8
130	2.7012	1.0697	926.1
140	3.6136	1.0798	916.9
150	4.7597	1.0906	907.4
160	6.2805	1.1144	897.3
180	10.0271	1.1275	886.9
190	12.552	1.1415	876.0
200	15.551	1.1565	864.7
225	25.504	1.1992	833.9
250	39.776	1.2512	799.2
275	59.49	1.3168	759.4
300	85.92	1.4036	712.5
325	120.57	1.5289	654.1
350	165.37	1.741	574.4
374.15	221.20	3.170	315.5

Para convertir el volumen específico de decímetros cúbicos por kilo-

Diagrama de Planta Geotérmica ORMAT-Momotombo.

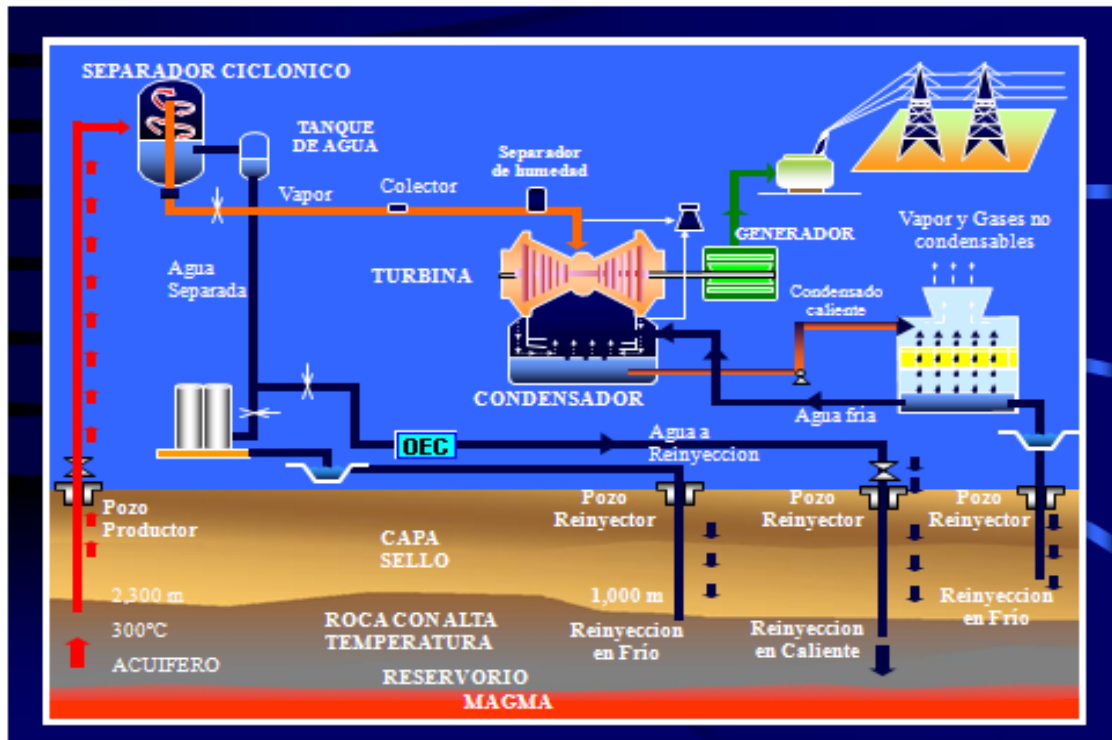
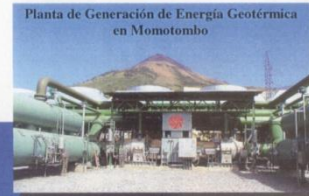
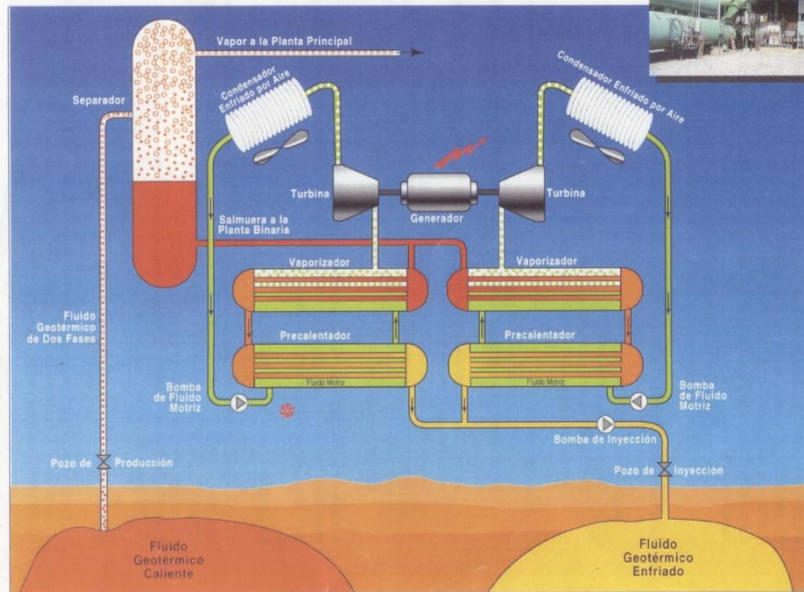


Diagrama de ORMAT Energy Converter (OEC).

Unidad de Salmuera Tipo Binaria para Doble Turbina



www.ormat.com

ormat@ormat.com

Costo de Silicato de calcio

Xinmi Jinding Keep Warm Refractory Co., Ltd. [Verificado]

Productos ▾

Detalles de la Empresa ▾

Datos de contacto



precio de silicato de calcio

Precio FOB:	US \$110 - 180 / Metro cúbico Obtenga el Último Precio
Puerto:	Qingdao Port
Cantidad de pedido mínima:	20 Metro cúbico/s
Capacidad de suministro:	20000 Metro cúbico/s por Año
Plazo de entrega:	23 de unos días
Condiciones de pago:	L/C,T/T



Ms. Doris Han



Contactar Proveedor

Figura 5.11 Momentos y fuerzas en una espira usando la carta M.W. Kellog.

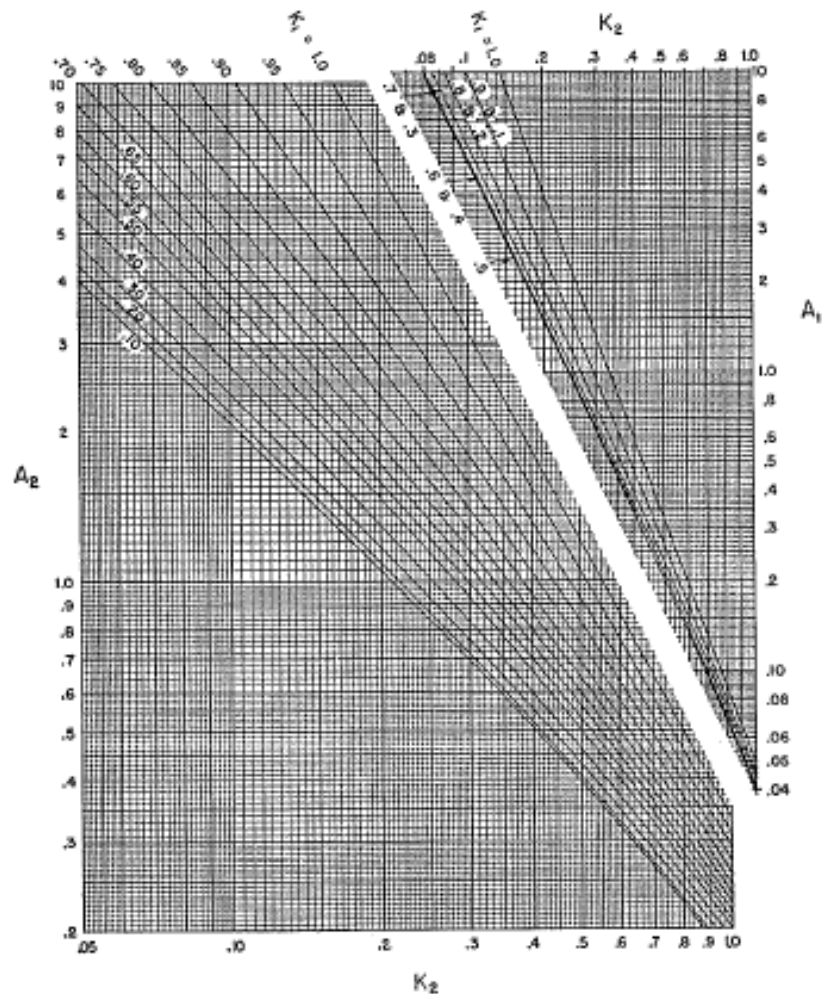
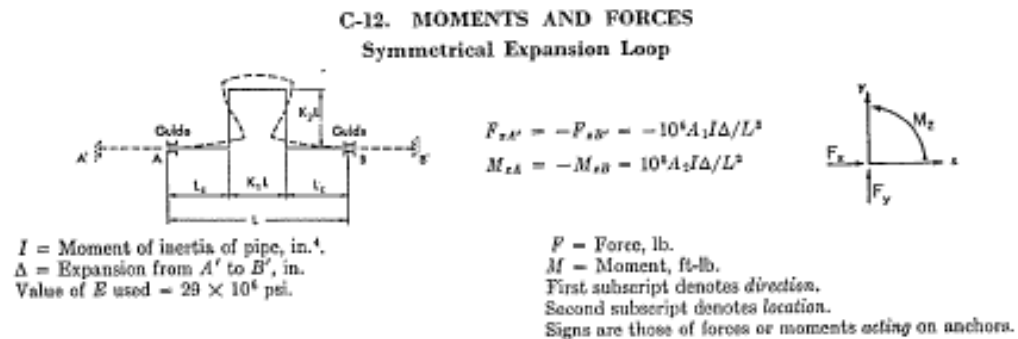


Figura 5.12 Nomograma para determinar el tamaño de espira.

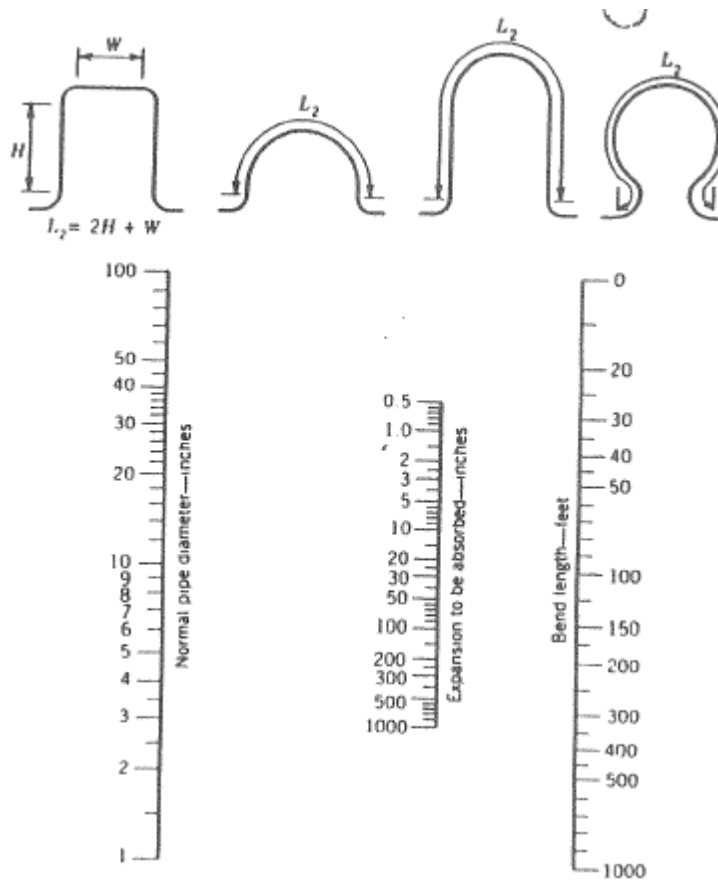


Tabla A4. 4 Propiedades y pesos de tubería

Nominal Size Outside Diameter inches <i>D</i>	Weight Designation and/or Schedule Number	Average Wall Thick- ness inches <i>t</i>	Mini- mum Wall Thick- ness (= 3/80) inches <i>t_m</i>	Inside Diam- eter inches <i>d</i>	Cross- Sectional Metal Area square inches <i>A</i>	Moment of Inertia inches ⁴ <i>I</i>	Sec- tion Mod- ulus inches ³ <i>Z</i>	Bend Charac- teristic per Unit Bend Radius 1/ft <i>k/R</i>	Radius of Gyra- tion inches <i>r_g</i>	Weight of			
										Pipe lb per ft <i>w_p</i>	Water lb per ft <i>w_w</i>		
12" 12.750	Std.	5S	0.165	0.144	12.420	6.52	129	20.3	0.050	4.45	19.6	52.5	
		10S	0.180	0.158	12.390	7.11	141	22.0	0.055	4.44	24.2	52.2	
		20	0.250	0.219	12.250	9.82	192	30.0	0.077	4.42	33.4	51.1	
		30	0.330	0.289	12.090	12.9	249	39.0	0.103	4.39	43.8	49.7	
		40S	0.375	0.328	12.000	14.6	279	43.8	0.118	4.38	49.6	49.0	
		XS	40	0.406	0.355	11.938	15.7	300	47.1	0.128	4.37	53.5	48.5
			80S	0.500	0.438	11.750	19.2	362	50.7	0.160	4.33	65.4	47.0
			60	0.562	0.492	11.625	21.5	401	62.8	0.182	4.31	73.2	46.0
			80	0.625	0.547	11.500	23.8	439	68.8	0.204	4.29	80.9	45.0
	XS	80	0.687	0.601	11.375	26.0	475	74.5	0.227	4.27	88.5	44.0	
			100	0.750	0.655	11.250	28.3	511	80.2	0.250	4.25	96.2	43.0
			100	0.843	0.738	11.004	31.5	562	88.1	0.285	4.22	107	41.6
			120	0.875	0.766	11.000	32.6	579	90.8	0.298	4.21	111	41.1
			140	1.000	0.875	10.750	36.9	642	101	0.348	4.17	125	39.3
			160	1.125	0.983	10.500	41.1	701	110	0.400	4.13	140	37.5
			180	1.312	1.149	10.126	47.1	781	123	0.481	4.07	160	34.9
			14" 14.000	Std.	10	0.250	0.219	13.500	10.8	255	36.5	0.064	4.86	36.7	62.0
20	0.312	0.273			13.375	13.4	315	45.0	0.080	4.84	45.7	60.6	
30	0.375	0.328			13.250	16.1	373	53.3	0.097	4.82	54.6	59.7	
40	0.438	0.382			13.125	18.7	429	61.4	0.114	4.80	63.4	58.6	
XS	40	0.500		0.438	13.000	21.2	484	69.1	0.132	4.78	72.1	57.5	
		60		0.593	0.519	12.814	25.0	562	80.3	0.158	4.74	84.9	55.9
		80		0.625	0.547	12.750	26.3	589	84.1	0.168	4.73	89.3	55.3
		80		0.750	0.656	12.500	31.2	687	98.2	0.205	4.69	106	53.1
		100		0.875	0.766	12.250	36.1	781	112	0.244	4.65	123	51.1
XS	100	0.937		0.820	12.125	38.4	825	118	0.264	4.63	131	50.0	
		120		1.093	0.956	11.814	44.3	930	133	0.315	4.58	151	47.5
		140		1.250	1.094	11.500	50.1	1030	147	0.369	4.53	170	45.0
		160		1.406	1.230	11.188	55.6	1120	160	0.428	4.48	189	42.6
		10		0.250	0.219	15.500	12.4	384	48.0	0.048	5.57	42.1	81.7
		20		0.312	0.273	15.376	15.4	474	59.3	0.061	5.55	52.3	80.5
		30		0.375	0.328	15.250	18.4	562	70.3	0.074	5.53	62.6	79.1
		40		0.500	0.438	15.000	24.4	732	91.5	0.100	5.48	82.8	76.5
16" 16.000	XS	40	0.625	0.547	14.750	30.2	894	112	0.127	5.44	103	74.1	
			60	0.636	0.574	14.688	31.6	923	117	0.134	5.43	108	73.4
			80	0.750	0.655	14.500	35.9	1050	131	0.155	5.40	122	71.5
			80	0.843	0.738	14.314	40.1	1160	145	0.176	5.37	136	69.7
	XS	100	0.875	0.766	14.250	41.0	1190	149	0.184	5.36	141	69.1	
		100	1.031	0.902	13.938	48.5	1370	171	0.221	5.29	165	66.1	
			120	1.218	1.066	13.564	56.6	1560	195	0.268	5.23	192	62.6
			140	1.438	1.258	13.124	66.8	1760	220	0.325	5.17	224	58.6
			160	1.503	1.394	12.814	72.1	1890	237	0.368	5.12	245	55.9

Tabla A1.1 Expansión térmica Total

TOTAL THERMAL EXPANSION, U.S. UNITS, FOR METALS¹
Total Linear Thermal Expansion Between 70°F and Indicated Temperature, in./100 ft

Temp., °F	Material							
	Carbon Steel Carbon-Moly- Low-Chrome (Through 3Cr-Mo)	5Cr-Mo Through 9Cr-Mo	Austenitic Stainless Steels 18Cr-8Ni	12Cr, 17Cr, 27Cr	25Cr-20Ni	UNS N04400 Monel 67Ni-30Cu	3 ¹ / ₂ Ni	Copper and Copper Alloys
-450	...	...	...	...	...	...	...	-3.93
-425	...	...	...	...	...	...	...	-3.93
-400	...	...	...	...	...	...	...	-3.91
-375	...	...	...	...	...	...	...	-3.87
-350	...	...	...	...	...	...	...	-3.79
-325	-2.37	-2.22	-3.85	-2.04	...	-2.62	-2.25	-3.67
-300	-2.24	-2.10	-3.63	-1.92	...	-2.50	-2.17	-3.53
-275	-2.11	-1.98	-3.41	-1.80	...	-2.38	-2.07	-3.36
-250	-1.98	-1.86	-3.19	-1.68	...	-2.26	-1.96	-3.17
-225	-1.85	-1.74	-2.96	-1.57	...	-2.14	-1.86	-2.97
-200	-1.71	-1.62	-2.73	-1.46	...	-2.02	-1.76	-2.76
-175	-1.58	-1.50	-2.50	-1.35	...	-1.90	-1.62	-2.53
-150	-1.45	-1.37	-2.27	-1.24	...	-1.79	-1.48	-2.30
-125	-1.30	-1.23	-2.01	-1.11	...	-1.59	-1.33	-2.06
-100	-1.15	-1.08	-1.75	-0.98	...	-1.38	-1.17	-1.81
-75	-1.00	-0.94	-1.50	-0.85	...	-1.18	-1.01	-1.56
-50	-0.84	-0.79	-1.24	-0.72	...	-0.98	-0.84	-1.30
-25	-0.68	-0.63	-0.98	-0.57	...	-0.77	-0.67	-1.04
0	-0.49	-0.46	-0.72	-0.42	...	-0.57	-0.50	-0.77
25	-0.32	-0.30	-0.46	-0.27	...	-0.37	-0.32	-0.50
50	-0.14	-0.13	-0.21	-0.12	...	-0.20	-0.15	-0.22
70	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0.23	0.22	0.34	0.20	0.32	0.28	0.23	0.34
125	0.42	0.40	0.62	0.36	0.58	0.52	0.42	0.63
150	0.61	0.58	0.90	0.53	0.84	0.75	0.61	0.91
175	0.80	0.76	1.18	0.69	1.10	0.99	0.81	1.20
200	0.99	0.94	1.46	0.86	1.37	1.22	1.01	1.49
225	1.21	1.13	1.75	1.03	1.64	1.46	1.21	1.79
250	1.40	1.33	2.03	1.21	1.91	1.71	1.42	2.09
275	1.61	1.52	2.32	1.38	2.18	1.96	1.63	2.38
300	1.82	1.71	2.61	1.56	2.45	2.21	1.84	2.68
325	2.04	1.90	2.90	1.74	2.72	2.44	2.05	2.99
350	2.26	2.10	3.20	1.93	2.99	2.68	2.26	3.29
375	2.48	2.30	3.50	2.11	3.26	2.91	2.47	3.59
400	2.70	2.50	3.80	2.30	3.53	3.25	2.69	3.90
425	2.93	2.72	4.10	2.50	3.80	3.52	2.91	4.21
450	3.16	2.93	4.41	2.69	4.07	3.79	3.13	4.51
475	3.39	3.14	4.71	2.89	4.34	4.06	3.35	4.82
500	3.62	3.35	5.01	3.08	4.61	4.33	3.58	5.14
525	3.86	3.58	5.31	3.28	4.88	4.61	3.81	5.45
550	4.11	3.80	5.62	3.49	5.15	4.90	4.04	5.76

(continued)